

FUMIGADORA DE ESPALDA CON CONTROL ELECTRÓNICO DE FLUJO

CHRISTIAN EDUARDO GUAQUETA MEDINA
DIEGO ALEJANDRO BAQUERO HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ D.C.
2018

FUMIGADORA DE ESPALDA CON CONTROL ELECTRÓNICO DE FLUJO

CHRISTIAN EDUARDO GUAQUETA MEDINA
DIEGO ALEJANDRO BAQUERO HERNÁNDEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico y de
Telecomunicaciones

Director
JOSÉ ROBERTO CUARAN VALENZUELA
Ingeniero Electrónico, MSc.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ D.C.
2018



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, noviembre de 2018

DEDICATORIA

El presente Trabajo de Grado está dedicado a:

Dios.

Por haberme dado la oportunidad de desarrollar y culminar con esta etapa de pregrado de la mejor manera.

Mis Padres.

Por su gran apoyo, comprensión y compañía en toda mi educación, y ser los que me han dado fuerza por avanzar y culminar mis estudios.

Christian Eduardo Guáqueta Medina.

Dios.

Por haberme permitido concluir esta etapa importante de mi vida y por darme la sabiduría necesaria para culminar mi formación.

Mis padres y hermano.

Por guiarme en todo lo que soy, por su buen ejemplo y por su incondicional apoyo y acompañamiento en este camino de la vida y sobre todo por su amor.

Diego Alejandro Baquero Hernández.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

Ingeniero José Roberto Cuarán, por su acompañamiento académico y apoyo en el desarrollo del proyecto, por compartir con nosotros sus conocimientos.

Ingeniero Daniel Eduardo Ávila, por su incondicional apoyo en la propuesta, por su asesoría profesional en el desarrollo del prototipo.

A nuestros familiares quienes nos han brindado el apoyo sin límites en los buenos y malos momentos. A la Universidad Católica de Colombia en conjunto a sus docentes que nos guiaron durante esta etapa de educación, ayudándonos a crecer no solo como profesionales, sino como personas.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	17
1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
2 OBJETIVOS	21
2.1 OBJETIVO GENERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3 JUSTIFICACION	22
4 ANTECEDENTES	23
4.1 Tipos de Fumigadores	23
4.2 Tipos de Control de Aspersión	29
5 MARCO DE REFERENCIA	35
5.1 Marco Teórico	35
5.2 Marco Conceptual	50
6 METODOLOGÍA	57
6.1 Recopilar Información	57
6.2 Diseño	58
6.3 Implementación	59
7 DISEÑO	60
7.1 Selección de Componentes	60
7.2 Diagrama de Bloques del Sistema Eléctrico	67
7.3 Plano Esquemático del Flujo	68
7.4 Diagrama de Bloques del Sistema de Control	69
7.5 Requerimientos de la interfaz de usuario	70
8 IMPLEMENTACIÓN	71
8.1 Construcción del Prototipo	71
8.2 Programación del sistema Digital	79
8.3 Pruebas y Validación	84
9 PRUEBAS DE CAMPO	94

10	ANÁLISIS DE RESULTADOS	99
11	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	100
	CONCLUSIONES	101
	BIBLIOGRAFÍA	102
	ANEXOS	107

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones de uso de las boquillas.....	40
Tabla 2: Tipo de boquillas con respectivos factores de uso.....	56
Tabla 3: Consumo de Corriente del Prototipo.....	60
Tabla 4: Agroquímicos aplicados a la fumigación.....	94

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Pulverizador Portátil Eléctrico.	24
Figura 2: Pulverizador Eléctrico de Espalda.	25
Figura 3: Pulverizador Estacionario eléctrico	26
Figura 4: Sistema cónico de ventilación e inyectores.	27
Figura 5: Pulverizador Portátil Eléctrico.	28
Figura 6: Sistema de fumigación de precisión acoplado en un tractor.	29
Figura 7: Sistema de fumigación de precisión acoplado en un tractor.	30
Figura 8: Distribuidor liquido implementado en el pulverizador.	31
Figura 9: Diagrama del Atomizador.	34
Figura 10: Esquema de una bomba giratoria.	36
Figura 11: Bomba de Tipo Diafragma.	36
Figura 12: Motor acoplado a la unidad de la bomba, Impulsor.	37
Figura 13: Medidor de Flujo de Turbina	38
Figura 14: Diagrama del comportamiento del flujo con respecto a obstáculo.	39
Figura 15: Diagrama de funcionamiento del medidor de flujo magnético.	40
Figura 16: Convenciones de la Tabla 1.	42
Figura 17: Caudales de las boquillas tipo abanico y tipo cono.	42
Figura 18: Elementos de un Sistema de Control en Lazo Abierto.	43
Figura 19: Diagrama de Bloques de un Sistema de control en Lazo Cerrado.	44
Figura 20: Diagrama de Bloques de un sistema de control digital.	44
Figura 21: Diagrama de Bloques de un sistema de control analógico.	45
Figura 22: Acumulador de Níquel – Cadmio.	47
Figura 23: Esquema de una Batería de Ion de Litio.	48
Figura 24: Esquema de una Batería de Plomo Acido.	49
Figura 25: Control de Flujo con Válvula vs Control de flujo con VFD.	52
Figura 26: Curva del sistema de una bomba constante.	53
Figura 27: Batería de Plomo – Acido.	61
Figura 28: Cargador de la Batería.	61
Figura 29: Bomba de Diafragma.	62
Figura 30: Sensor de Flujo.	63
Figura 31: Fumigadora Manual.	64
Figura 32: Boquilla de Aspersión tipo abanico y tipo cónico.	64
Figura 33: Boquilla de doble Aspersión tipo cónica.	64
Figura 34: Driver BTS 7960 – Puente H.	65
Figura 35: Tarjeta Arduino Nano.	66
Figura 36: Diagrama de pines de Arduino nano.	67
Figura 37: Diagrama de Bloques Eléctrico del Sistema de Control de Flujo.	68
Figura 38: Plano Hidráulico del Sistema de Control de Flujo.	69
Figura 39: Diagrama del sistema de Control.	70
Figura 40: Acople de Bomba manual al reservorio y al tanque presurizado.	71
Figura 41: Reservorio del Agroquímico.	72
Figura 42: Estructura de la Fumigadora (Posición posterior y anterior).	72
Figura 43: Válvula Manual – Manómetro	73

Figura 44: Adaptador del Sensor a la Manguera.	74
Figura 45: Montaje de Prueba.....	74
Figura 46: Valvula manual.	75
Figura 47: Acople de la Bomba a la Estructura.	75
Figura 48: Acople del Tubo del Reservorio a la Estructura.	76
Figura 49: Acople de la Bomba al Tanque de Presión.....	76
Figura 50: Bomba y batería instalados en la estructura.	77
Figura 51: Compartimiento de circuitos integrados.....	77
Figura 52: Interfaz de Usuario.....	78
Figura 53: Terminal de la interfaz de usuario.....	78
Figura 54: Maquina Fumigadora Automática.	79
Figura 55: Grafico del Cambio en el Sistema.....	80
Figura 56: Respuesta del sistema PWM.	81
Figura 57: Codificación de la Función de Transferencia en MATLAB 2016B	81
Figura 58: a) Lugar geométrico de las raíces del sistema b) Respuesta del sistema en lazo cerrado.	83
Figura 59: Algoritmo para puesta en prueba del sensor (parte 1).....	85
Figura 60: Algoritmo para puesta en prueba del sensor (parte 2).....	86
Figura 61: Visualización de volumen mediante puerto serial.	86
Figura 62: Volumen de líquido contenido en la probeta.	87
Figura 63: Diseño del control proporcional.	88
Figura 64: Respuesta del sistema al controlador proporcional.	89
Figura 65: Diseño del controlador integral puro.	90
Figura 66: Respuesta del sistema al control integral puro.	91
Figura 67: Diseño del controlador PI.....	92
Figura 68: Respuesta del sistema al controlador PI.....	93
Figura 69: Imagen satelital del sitio de prueba	94
Figura 70: Agroquímicos utilizados.	95
Figura 71: Mezcla de agroquímicos.	95
Figura 72: Carga de la mezcla al tanque de la máquina.....	96
Figura 73: Planta de tomate.....	97
Figura 74: Prueba en cultivo de tomates.	97
Figura 75: Aspersión del agroquímico hacia la planta.	98
Figura 76: Batería LiPo Zippy.	107
Figura 77: Panasonic Batería.....	108
Figura 78: Batería LiPo Multistar.....	108
Figura 79: Bomba para Agua DC Shui Zhi.....	109
Figura 80: Bomba de Diafragma para Dispensador de Agua.	110
Figura 81: Bomba Para Riego.....	110
Figura 82: Sensor de Medición de Flujo G1/4.....	111
Figura 83: Caudalímetro Omega serie FTB600.	112
Figura 84: Sensor compacto de bajo flujo Tipo 8031	112
Figura 85: Modulo Mosfet.	113
Figura 86: Modulo Puente H.	113

ANEXOS

Anexo A. Batería LiPo Zippy.....	107
Anexo B. Batería Panasonic.....	107
Anexo C. Batería Multi Star	108
Anexo D. Bomba para Agua de Diafragma DC.....	109
Anexo E. Bomba de Diafragma para Dispensador de Agua.....	109
Anexo F. Bomba Para Riego BF.....	110
Anexo G. Sensor Medidor de Flujo G1/4.	111
Anexo H. Sensores de flujo Ultrabajo.	111
Anexo I. Sensor de bajo flujo para medición y control de lotes.....	112
Anexo J: Módulo Mosfet IRF 520.....	113
Anexo K: Módulo puente H BTS7960 de 43 A.....	113
Anexo L: Definición de las Variables del Sistema.....	114
Anexo M: Algoritmo de Interpretación de los Datos del Sensor de Flujo	114
Anexo N: Algoritmo para la inicialización y funcionamiento de la pantalla LCD...	115
Anexo O: Desarrollo del control PWM.	115
Anexo P: Limitaciones del PWM el impresión de datos.....	115

RESUMEN

La fumigación de cultivos ha sido el método de mayor uso en la agricultura colombiana, debido a la eficiencia del mismo en el control preventivo y eliminación de plagas, así como la eliminación de cultivos ilícitos mediante el uso de herbicidas de gran potencial, utilizando métodos como la aspersión en hojas y tallo, o la inyección en el suelo, en caso de aplicado o protección de las raíces. A diferencia de otras técnicas de control y eliminación de plagas, la fumigación es un método que afecta al medio ambiente, ya que la mayoría de los pesticidas utilizados para este fin, poseen componentes químicos tóxicos, que al momento de la aspersión, las gotas más livianas llegan a un destino diferente al de la planta que lo requiere; por efectos del viento, las partículas suspendidas en el aire son llevadas a otras fuentes, contaminando fauna, flora, atmósfera, fuentes fluviales, e incluso, la contaminación de productos de consumo humano de otros ámbitos.

Una forma de disminuir la contaminación ambiental que genera este tipo de control de plagas, es mediante la optimización en la aspersión de un pesticida o agroquímico en un cultivo, lo cual se puede lograr mediante el control de flujo del mismo. Esto permite además ahorrar cierto porcentaje de pesticida.

En este trabajo de grado se desarrolló un sistema de control de aspersión de pesticida, para una máquina fumigadora manual, con el fin de regular el flujo de pesticida o agroquímico que se pulveriza por la boquilla de salida. Para esto, se utilizó una bomba de tipo diafragma que permite regular el flujo mediante cambios de presión, un sensor de flujo de accionamiento por turbina para la medición del caudal, y un controlador digital, el cual se encarga de realizar el control automático del caudal mediante la variación de la velocidad de la motobomba, utilizando la técnica de modulación por ancho de pulso.

La interfaz de usuario del dispositivo permite la lectura del caudal, e incluye un resistor variable, cuya función es la de ingresar la consigna o referencia de caudal que debe mantener el controlador, según lo requiera el usuario dependiendo del tipo de cultivo, boquilla o agroquímico que se utilice para tal fin.

PALABRAS CLAVES: Agroquímico, Aspersión, Caracterización de la Planta, Control PI, Dosificación, Flujo, Fumigadora, Plaga, PWM, Sistema de Control.

GLOSARIO

AGROQUÍMICO: Sustancia química que utiliza el agricultor con el objetivo de optimizar el rendimiento de una explotación agrícola

ASPERSIÓN: Tipo de riego, el cual consiste en el esparcimiento de agua u otro líquido en forma de pequeñas gotas.

ATMEGA: Microcontroladores AVR grandes con 4 a 256 kB de memoria flash programable, encapsulados de 28 a 100 pines, conjunto de instrucciones extendido (multiplicación y direccionamiento de programas mayores) y amplio conjunto de periféricos.

BOQUILLA: Mecanismo de pulverización de un fluido, se compone de un tubo, el cual, en un extremo ingresa el fluido comprimido, y en el otro extremo posee una abertura con un diámetro en el orden de los milímetros.

CEROS: Raíces del numerador de una función de transferencia de un sistema dinámico.

CONTROLADOR: Consiste en un algoritmo, el cual es implementado a través del modo software en un microprocesador o hardware, con el fin, de que el conjunto (software y hardware) interaccione con los módulos que componen un dispositivo

CONTROLADOR IC: Es un controlador de búfer / línea de 8 bits con salidas de 3 estados. El dispositivo se puede utilizar como dos búferes de 4 bits o un búfer de 8 bits.

DOSIFICACIÓN: Administración de la dosis de un medicamento como parte de un tratamiento, expresado generalmente como cantidad por unidad de tiempo.

FERTILIZANTE FOLIAR: Es un tipo de fertilizante, el cual es suministrado a las plantas en sus hojas mediante la aspersión, este método se utiliza para tipos de plantas carentes de raíces.

FUMIGACIÓN: Es un método de eliminación de plagas, mediante el uso de polvos en suspensión, vapores, gases, químicos o humo, con el fin de descontaminar un terreno o área en específico.

FUNGICIDA: Son sustancias químicas, tóxicas que se utilizan para la descontaminación de hongos u moho presentes, generalmente en animales y personas.

HERBICIDA: Es un producto químico u orgánico que se utiliza para inhibir o interrumpir el desarrollo de plantas indeseadas, también conocidas como malas hierbas, en terrenos que han sido o van a ser cultivados.

L.C.D (Liquid Crystal Display): Es una pantalla de cristal líquido o LCD es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos colocados delante de una fuente de luz o reflectora.

M.O.S.F.E.T (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor): Es un transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas. Es el transistor más utilizado en la industria microelectrónica, ya sea en circuitos analógicos o digitales, aunque el transistor de unión bipolar fue mucho más popular en otro tiempo.

PESTICIDA: Sustancia o mezcla de sustancias dirigidas a destruir, prevenir, repeler, o mitigar alguna plaga.

PLAGA: Se conoce como plaga a la irrupción súbita y multitudinaria de insectos, animales u otros organismos de una misma especie que provoca diversos tipos de perjuicios.

POLOS: Raíces del denominador de una función de transferencia de un sistema dinámico.

PROTOCOLO I²C: Es un bus serie de datos desarrollado en 1982 por Philips, se utiliza principalmente internamente para la comunicación entre diferentes partes de un circuito, por ejemplo, entre un controlador y circuitos periféricos integrados.

PUENTE H: Es un circuito electrónico que generalmente se usa para permitir a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos, avance y retroceso. Son ampliamente usados en robótica y como convertidores de potencia.

PUERTO SERIAL: interfaz de comunicaciones de datos digitales, frecuentemente utilizado por computadoras y periféricos, donde la información es transmitida bit a bit, enviando un solo bit a la vez.

PULVERIZACION: Esparcimiento de un líquido en gotas diminutas, mediante el sometimiento de un fluido bajo presión, a ser expulsado por una boquilla.

P.W.M (Pulse Width Modulation): La modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), es una técnica que logra producir el efecto de una señal analógica sobre una carga, a partir de la variación de la frecuencia y ciclo de trabajo de una señal digital.

RUIDO DE LA SEÑAL: Interferencias que se generan en la señal por la presencia de frecuencias presentes en el medio.

TRANSISTOR: Es un dispositivo electrónico semiconductor utilizado para entregar una señal de salida en respuesta a una señal de entrada.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en Colombia aún se utilizan equipos de riego ya obsoletos, cuyas fuentes de potencia son motores de combustión interna, o bien, dispositivos acoplados a tractores, lo cual eleva su costo de compra y suelen ser menos amigables con el medio ambiente. El uso de tractores limita la fumigación debido a su anchura, así como también el espacio entre los surcos, desperdiciándose cierta área que se podría aprovechar para el sembrado. Adicionalmente, estos sistemas conllevan al desperdicio de agroquímicos, ya que no cuentan con un sistema de aspersión que permita un mayor control del líquido. Por otra parte, el rociador no tiene una precisión aceptable en la dispersión del veneno hacia las hojas.

Otro factor a tener en cuenta es la contaminación ambiental que genera el exceso de aspersión de pesticidas en un cultivo, ya que, al no regular el caudal y la presión del agroquímico con respecto a la boquilla, se crea una sobre-pulverización, haciendo que las gotas que son expulsadas sean tan livianas que no alcanzan a adherirse en las hojas y tallos del cultivo, sino que permanecen flotando en el aire, y con las corrientes de vientos, se trasladan a otros campos, afectando ecosistemas cercanos.

En Colombia, no se cuenta con un control adecuado en cuanto a la contaminación por pesticidas, incluso, la principal preocupación del gobierno actualmente, es el combate contra los cultivos ilícitos a cualquier costo, sin medir las consecuencias. El método más efectivo contra los cultivos ilícitos, es el uso del Glifosato, conocido por ser un herbicida de alto nivel de toxicidad, y catalogado como cancerígeno para los seres humanos. Otra falencia está, en que no se cuenta con rangos de aplicación máxima, que regule el uso excesivo del agroquímico, generando así problemáticas, como por ejemplo entre agricultores y apicultores, en donde el exceso de aspersión de pesticidas en los cultivos, genera muerte masiva de abejas.

¹

El presente trabajo de Grado, consiste en el desarrollo de un dispositivo de fumigación autónomo que permite mejorar la calidad del regado de la planta, este dispositivo cuenta con una bomba electrónica que genera la presión del líquido, la cual, es expulsada hacia la planta de manera controlada mediante una boquilla de pulverización, el sistema de control cuenta con tres tipos de magnitud de regado. La intención de este sistema también es el poder aplicar ciertas vitaminas en el área de la raíz de la planta, por tanto, estas deben ser inyectadas en la tierra, dentro del área donde se encuentran las raíces, así como también insecticidas que permiten

¹ BRAND, CARLOS. Más de mil millones de abejas han muerto en Colombia en los últimos tres años (en línea). 16 de Febrero de 2018. Recopilado en: 21 de Octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2EyfHaA>).

proteger las mismas, de larvas que las destruyen. La fumigadora viene con una configuración portátil y de operación para un solo surco.

Se recopiló información de patentes de sistemas de fumigación para cultivos, con la intención de mejorar la tecnología que poseen los equipos que ya se encuentran en el mercado, y mejorar los métodos convencionales que utilizan los pequeños y medianos agricultores.

El dispositivo consiste de una fumigadora de espalda manual, la cual se le reemplazó el sistema de presión o bomba manual por una bomba eléctrica con presión regulable, así mismo, se le instaló un controlador de flujo que le permite al usuario dosificar el pesticida dependiendo del tipo de agroquímico y boquilla a utilizar. Este trabajo de grado se implementó con el fin de crear un dispositivo amigable al medio ambiente, ya que, la fumigadora no requiere del uso de motores de combustión interna, dosifica el agroquímico evitando el exceso de aspersión del mismo, y de fácil intervención con respecto al operador.

Este trabajo de grado se encuentra enmarcado en la línea de investigación de tecnologías para la sustentabilidad de las comunidades, y cuyo eje temático es la agricultura de precisión.

1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Existen diferentes tipos de plagas que afectan los cultivos, atacando sus hojas, tallos y raíces, lo que genera bajo rendimiento y calidad en la producción. Las plagas son organismos transportados por el viento, lluvias, animales y hasta los seres humanos. Las plagas atacan las hojas y en algunas circunstancias el tallo, por contacto directo, otros organismos sobreviven en el suelo, y dependiendo de las condiciones ambientales atacan sus plantas mesoneras.²

Las plagas y enfermedades transfronterizas de las plantas pueden propagarse fácilmente mediante el comercio, factores que facilitan el transporte del virus vienen siendo por los movimientos migratorios de las personas, por factores ambientales como el tiempo y desplazamiento del virus a través del viento, y la transmisión vectorizada de patógenos perjudicando la agricultura de varios países en especial los subdesarrollados, y adquirir dimensiones de epidemia. Los brotes y los recrudecimientos pueden provocar pérdidas enormes de cultivos y pastos, poniendo en peligro el sustento económico de los agricultores vulnerables y la seguridad alimentaria del sector afectado.³

En todo cultivo de alto rendimiento, los frutos requieren de un monitoreo y control de plagas frecuente, por ello, los agricultores deben realizar chequeos constantes del cultivo, así como fumigar de manera preventiva para evitar el crecimiento descontrolado de las plagas o de forma correctiva si ya existe algún factor que afecte el buen estado de la planta. La mayoría de cultivos ofrecen una mejor calidad del producto cultivándola al aire libre, el uso de invernaderos como ventaja protege los cultivos de ciertas plagas y acelera la maduración de la fruta, pero disminuye su calidad en el color y textura, y además incrementa el costo de infraestructura. El cultivar al aire libre expone a la planta a un alto índice de plagas y enfermedades.

El control de plagas y enfermedades para cualquier tipo de cultivo, requiere de la fumigación, o bien de venenos para eliminar los insectos, herbicidas para eliminar la maleza, y el inyectado de vitaminas a la raíz de la planta para mejorar la eficiencia de la misma en su producción y evitar que contraiga hongos. La contraparte de la fumigación, viene dada por la contaminación del aire con sustancias tóxicas, como también puede repercutir en daños a otras actividades rurales, como la apicultura o campos en los que se trabaja la fauna.

² NAVARRO, KRYSTEL. ¿Qué plagas afectan nuestros cultivos? (en línea). 27 de febrero de 2017. Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2rp4JyR>).

³ FAO. Plagas y enfermedades de las Plantas (en línea). Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2CW3xv5>).

La fumigación masiva es un problema alarmante en el momento de fumigar los cultivos ilícitos con Glifosato. En el año 2000, se creó el Plan Colombia, el cual tiene entre sus objetivos la eliminación de cultivos ilícitos mediante la fumigación masiva, considerándose un método efectivo, pero que conlleva a consecuencias para los habitantes que se encuentran alojados en zonas cercanas a los cultivos, generando problemas de salud. Se estima que, en solo el departamento de Putumayo, la fumigación ha perjudicado a más de 300 mil personas, con problemas de salud como náuseas, dermatitis y trastornos estomacales, caso similar para los habitantes de Rio Blanco de Sotar. ⁴

El método de fumigación masiva no utiliza un sistema de regulación para la aspersión del agroquímico, ya que la intensidad del mismo, es que a mayor cantidad de herbicida sea sometida la planta, mayor va a ser la posibilidad de la eliminación de la misma. Otra consecuencia que se tiene para este caso viene dada por la presión a la que es sometida el fluido en las boquillas, lo cual, a medida que la presión sea muy alta, las gotas que pulveriza la boquilla van a ser tan livianas que, no se impregnaran en la planta, sino que permanecerá en el aire, creando a partir de esto, la contaminación atmosférica. Uno de los pilares de la agricultura de precisión, es la aplicación de agroquímicos en el lugar adecuado y en la cantidad adecuada. Esto último requiere de un sistema de control, que permita dosificar de forma exacta la cantidad de agroquímico requerido.

El presente trabajo de grado tiene como limitaciones, el uso de la máquina para el trabajo en solo cultivos menores a una hectárea, debido a que la máquina solo ejecuta la fumigación de un solo surco a la vez. El sistema de control de flujo no está diseñado para trabajar con más de un conjunto de válvula de aspersión (Válvula manual, tubo, boquilla). Así mismo, el sistema de control de flujo, posee un rango de control de caudal que se encuentra desde 300 cc/min hasta los 1000 cc/min, dado el rango, solo permite el óptimo funcionamiento con las boquillas que trabajan bajo este rango de caudal. La autonomía del dispositivo es de 8 horas de trabajo continuo, esto se tuvo en cuenta con respecto a las jornadas laborales que asume un agricultor en el campo.

En este orden de ideas, en este trabajo se plantea resolver la pregunta de investigación ¿Cómo implementar un sistema de fumigación con control de flujo para regular el agroquímico necesario para el cultivo?

⁴ Mattié, Mailer. Las fumigaciones del Plan Colombia (en línea). 10 de julio del 2003. Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2JdFc4s>).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una máquina fumigadora de espalda con sistema de alimentación eléctrico y control electrónico de flujo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información sobre sistemas de pulverización hidráulica e instrumentación requerida por un sistema de control de flujo.
- Adaptar un sistema de presurización eléctrica a una máquina fumigadora manual con un sistema de alimentación por baterías.
- Implementar un sistema de control automático de flujo que permita regular la dosis de aspersión de agroquímicos y una interfaz de usuario que permita establecer el flujo requerido.
- Validar el funcionamiento del sistema en campo.

3 JUSTIFICACION

La agricultura ha sido la fuente económica más importante en el desarrollo de la economía de Colombia, ya que, genera ingresos en el área rural, desarrolla la seguridad alimentaria, reduce la pobreza, y estabiliza el desarrollo sostenible del país.⁵ En la actualidad, la mayoría de los países, la población ha aumentado de manera exponencial, por lo que la demanda de alimentos también ha de aumentar, por esto, la agricultura ha tenido que evolucionar en cuanto a su tecnología, haciendo que los cultivos sean más eficientes en la menor área de granja y tiempo posible.

La fumigación en el país ha sido tradicionalmente mediante método manual, en el que se solicita jornales intensivos de mano de obra y tiempo, con los inminentes riesgos ambientales, humanos y económicos. La realidad colombiana en cuanto a la mecanización de la fumigación muestra las etapas tecnológicas que aún se deben desarrollar: apenas se está dando el salto de la fumigación motorizada tipo morral a la estacionaria o acoplada a tractor, o en el caso de los llanos orientales con el método de autopropulsión.⁶

En Colombia, la tecnificación de los cultivos ha sido una polémica para los agricultores, en vista del aumento del costo que genera la maquinaria, como también la poca capacidad que tienen los trabajadores, en el control y operación de la misma. Aun así, la tecnología busca crear sistemas lo más autónomos posible, y que presenten mayor rentabilidad en las funciones con respecto a los cultivos. La principal relevancia de este proyecto viene dada por la eficiencia del dispositivo de fumigación, puesto que permite una mayor exactitud en la cantidad de agroquímico aplicada con respecto a la cantidad necesaria del mismo. Esto conlleva a un mayor ahorro de insumos, así como también, disminuir a cierto factor, la aplicación de insecticidas en exceso, pues estas sustancias químicas al ser medianamente tóxicas pueden afectar el medio ambiente y en otras actividades rurales como la apicultura.

La intención de este proyecto fue optimizar el rendimiento de una máquina fumigadora, mediante componentes eléctricos, que en su modo de operación no afectan el medio ambiente, y así mismo, desde la ingeniería electrónica, se diseñó un controlador automático de tipo proporcional integral, en el objetivo de mejorar la dosificación en la aplicación de cualquier tipo de plaguicida en los cultivos.

⁵ VARGAS GAITÁN, Katherine. La agricultura colombiana en el contexto de la globalización (en línea). 7 de marzo de 2016. Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2JTke9T>).

⁶ SEMANA, Si es fumigación, que sea mecanizada (en línea). 7 de enero de 2015. Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2CYERCj>).

4 ANTECEDENTES

La agricultura ha sido una actividad por defecto de las más importantes en cualquier país, debido a lo vital que es el alimento para el hombre, por esto, la agricultura ha venido tecnificándose con el paso del tiempo, diseñándose dispositivos que permitan mejorar la calidad del trabajo que se realiza. La fumigación ha sido una actividad de vital importancia para los cultivos, considerando esta como preventiva para el control de plagas. La fumigación es uno de los métodos más utilizados para el control y eliminación de las plagas, a pesar de ser muy efectivo, debe usarse como última opción debido a los daños ambientales que generan los agroquímicos. A continuación, se darán a conocer los tipos de dispositivos de fumigación existentes (portátil, estacionario y acoplado a tractor), como también se darán a conocer dispositivos ya diseñados con cierto nivel de tecnificación para optimizar el rendimiento de la fumigación.

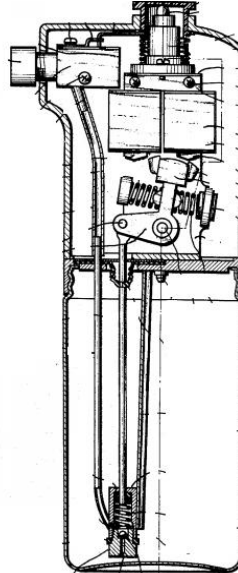
4.1 TIPOS DE FUMIGADORES

Los sistemas de fumigación existentes dependen del tipo de fumigación, frecuencia en la que se fumiga un cultivo, uso y tamaño del mismo, ya que, estos sistemas pueden ser tan elementales como los pulverizadores de mano, los cuales, se utilizan en jardines, o cultivos caseros, como también los hay portátiles y estacionarios para cultivos de mayor área, utilizados en granjas o fincas.

4.1.1 Pulverizador Eléctrico de Mano. (Diseñado en 1967) Como ejemplo de las fumigadoras de mano, este diseño de Lloyd King, visto en la Figura 1, consiste en un pulverizador eléctrico de mano, dotado de una unidad de potencia de aire comprimido, la cual es alimentada por una fuente de alimentación recargable. Para el control del dispositivo, se tiene de un interruptor normalmente abierto y un sistema de diodos que aíslan la energía externa del sistema de baterías. El interruptor normalmente abierto controla la válvula de abertura y cierre y el mini-compresor de aire comprimido, esto con la intención de evitar fugas debido al aumento de presión que genera el compresor en el contenedor.⁷

⁷ Takei, Hisao, Nobumichi Hattori, Naoyuki Iwata, y Seiji Morita. «Google Patents.» Electric sprayer. Patente No. 3,565,344. 30 de junio de 1967. (último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2AnWk4q>).

Figura 1: Pulverizador Portátil Eléctrico.



Fuente: Takei, Hisao, y Otros. Electric sprayer. Recopilado el: 18 de septiembre de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2AnWk4q>).

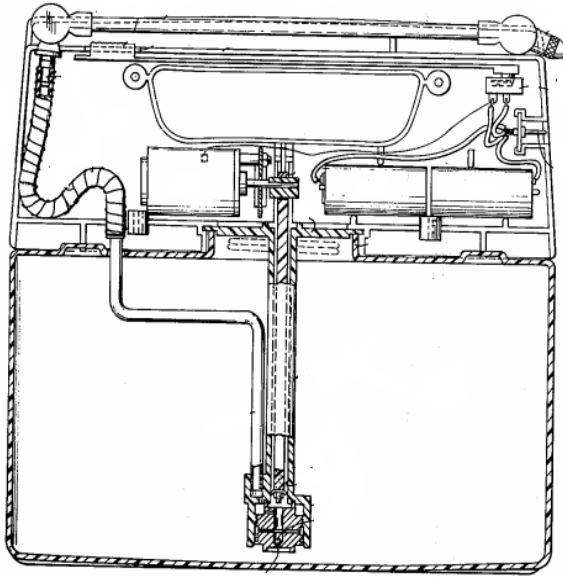
4.1.2 Pulverizador Eléctrico de Espalda. (Diseñado en 1975) El pulverizador eléctrico portátil diseñado por Bochmann, comprende un tanque y una bomba de pistón y un sistema de baterías. La estructura del tanque está compuesta principalmente por un reservorio para el agroquímico que se aplicará, y en la parte superior de la estructura, se aloja el sistema de baterías, el motor de la bomba y el interruptor del mismo. El sistema de bombeo consiste en una bomba de pistón que se encuentra dentro del reservorio, y su función es de generar aire comprimido el mismo mediante el movimiento del motor. A la salida de la bomba, se encuentra acoplado un tubo, en el que, en el otro extremo, va acoplado la manguera de la varilla de aspersión.

El interruptor se encarga de encender /apagar la bomba de compresión.⁸ La presente pulverizadora se puede observar en la figura 2, es un sistema bastante sencillo que incorpora una bomba eléctrica, y a pesar de que evita el uso de una bomba manual de palanca, su electrónica es bastante sencilla y básica, no posee un sistema que controle la presión y caudal del agroquímico a fumigar. Así mismo, la lanza no cuenta con una válvula de control de flujo manual, por lo que el control

⁸ Bochmann, Carl E. "Cordless electric sprayer." U.S. Patente No. 3,901,449. 26 agosto 1975. (último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2OFMQKN>).

de la salida del líquido en aspersión, solo se puede contrarrestar con el interruptor de la bomba de presión.

Figura 2: Pulverizador Eléctrico de Espalda.

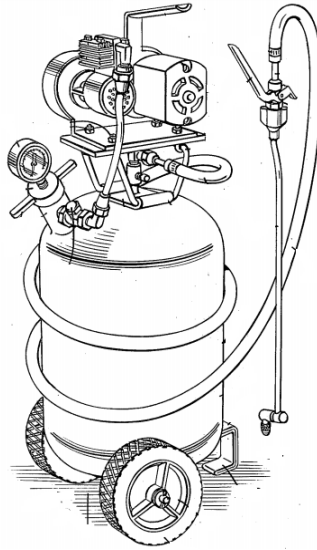


Fuente: Bochmann, Carl E. Cordless electric sprayer.U.S. Recopilado el: 18 de septiembre de 2018. Recopilado de: (<http://bit.ly/2OFMQKN>).

4.1.3 Fumigadora Eléctrica Estacionaria. (Diseñado en 1979) En la figura 3 se ilustra una patente de fumigadora estacionaria diseñada por Edward Bridges. El dispositivo está compuesto por un tanque cilíndrico, un compresor de aire y una manguera con su respectiva lanza de presión. El principio de funcionamiento es semejante al prototipo anterior, un compresor compuesto por una bomba de aire actuada por un motor eléctrico mediante dos poleas y una correa, el compresor inyecta aire comprimido, por medio de una manguera a la entrada de un tanque cilíndrico, y en el que, en el mismo, se confina el agroquímico. A la salida del tanque, se tiene un medidor de presión del tanque, y una válvula que controla el flujo de líquido que sale comprimido del tanque a la manguera que conecta la lanza. Una característica a tener en cuenta de este dispositivo es que es de tipo estacionario, ya que no cuenta con sistemas de baterías para hacerlo portátil y requiere de una fuente de alimentación externa para su funcionamiento.⁹

⁹ Bridges, Edward B., and Lillian K. Bridges. "Portable wheeled electric sprayer with pressurized liquid reservoir." U.S. Patente No. 4,135,669. 23 enero 1979. (último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2SaoXZX>).

Figura 3: Pulverizador Estacionario eléctrico



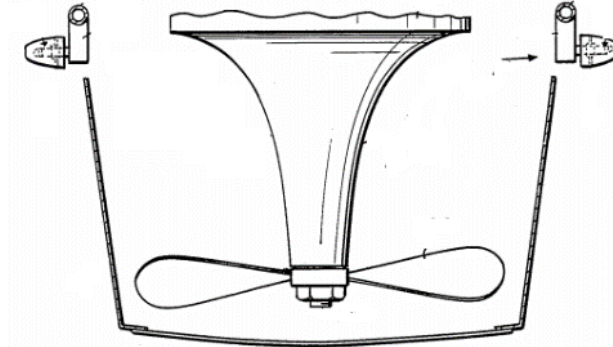
Fuente: Bridges, Edward B., and Lillian K. Bridges. Portable wheeled electric sprayer with pressurized liquid reservoir. Recopilado el: 18 de septiembre de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2SaoXZX>).

4.1.4 Sistema de Ventilación Cónico. (Diseñado en 1988) Un Sistema de fumigación que se utiliza para rociar veneno en grandes áreas de cultivo, en donde la precisión no es alta, son los sistemas acoplados a los tractores. La fumigadora diseñada por Gary Burls consiste en un conjunto de boquillas inductoras acopladas en un anillo con sus respectivas líneas de suministro que van conectadas a la bomba y el reservorio, y cuyo centro del anillo se encuentra un ventilador. En la figura 4 se observa que la carcasa está formada con una abertura de entrada ampliada, y una abertura de descarga de diámetro reducido, en donde, se encuentra el anillo cargado con un alto potencial eléctrico y las boquillas.

El ventilador de aire genera una corriente de aire de alta velocidad, la corriente de aire se dirige a la carcasa a través de su abertura de entrada donde la corriente de aire se acelera por la forma cónica de la carcasa hacia su abertura de descarga. El agroquímico es expulsado a través del orificio de descarga de la boquilla de pulverización en una corriente de partículas que se dirige a la abertura de descarga de diámetro reducido de la carcasa, cargada inductivamente por el anillo inductor y luego expulsada de la apertura por la corriente de aire a alta velocidad producida

por el ventilador de aire comprimido para la deposición sobre los árboles de un huerto u otros cultivos.¹⁰

Figura 4: Sistema cónico de ventilación e inyectores.



Fuente: Burls, Gary E., and William F. Parmentar. Inductor nozzle assembly for crop sprayers. Recopilado el: 18 de septiembre de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2Cz625z>).

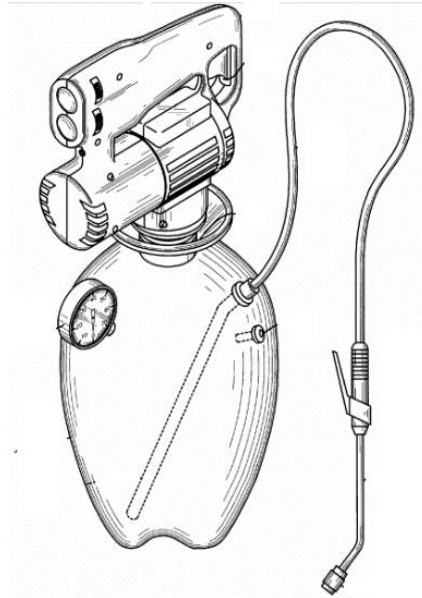
4.1.5 Pulverizador Portátil Eléctrico. (Diseñado en 1997) Otro tipo de rociador de jardín recargable diseñado por Casimer Jacyna, lo compone un módulo de compresor de aire y un recipiente con sus respectivas salidas, como se muestra en la figura 5. El módulo de compresor está compuesto por un sistema de baterías recargables, un motor eléctrico, una bomba de aire comprimido, un manómetro para la medición de la presión de aire que genera el compresor y un sistema de accionamiento del compresor por gatillo, y cuyo funcionamiento es mediante push-pull.

El módulo de compresor viene para que se le adapte, un recipiente el cual, en su parte superior, posee un adaptador en anillo para el acople del módulo, y unos empaques que permiten mantener la presión de aire que genera el compresor dentro del recipiente. Así mismo dentro del recipiente, en la abertura superior de acople, se introduce la mezcla de agroquímicos para su aspersión. El contenedor posee tres salidas, en donde la primera se le adapta un medidor de presión, la segunda es para el acople de un sistema de seguridad de presión, el cual se activa en el momento en que la presión de fluido interno llegue a su punto crítico, permitiendo la salida involuntaria de la presión, evitando que el contenedor explote.

¹⁰ Burls, Gary E., and William F. Parmentar. "Inductor nozzle assembly for crop sprayers." U.S. Patente No. 4,762,274. 9 agosto 1988. (último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2Cz625z>).

La tercera entrada, posee un adaptador de anillo que permite el acople del tubo que interconecta la manguera y la lanza de fumigación.¹¹

Figura 5: Pulverizador Portátil Eléctrico.



Fuente: Gianino , Rosario. Portable home and garden sprayer, power unit. Recopilado el: 18 de septiembre de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2qeXQ3j>).

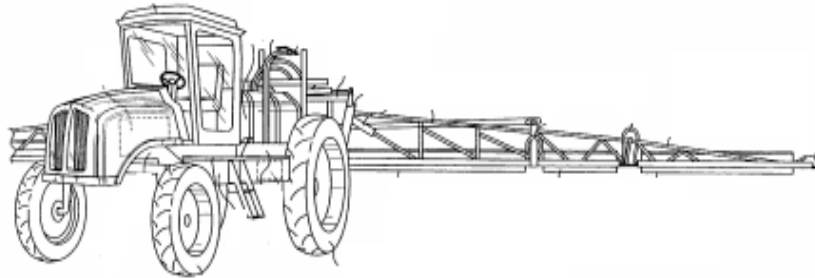
4.1.6 Sistema de fumigación acoplado a Tractor. (Diseñado en 2000) Otro sistema de fumigación acoplado a tractores, es el que se puede ver en la Figura 6, compuesta por un brazo bastidor desplazable, un reservorio para el agroquímico, un sistema de bombeo y el tractor que desplaza el dispositivo. La estructura de fumigación esta soportada por la grúa del tractor, y se compone del brazo bastidor, el cual, van acoplados las boquillas de aspersión con sus respectivas mangueras, el tanque de almacenamiento, en donde se confina el agroquímico, una bomba hidráulica, la cual, es actuada mediante el toma-fuerza del tractor, una bomba eléctrica, y la bomba de roseado.

El sistema de fumigación cuenta también con un recipiente de medición en el que se mezclan los químicos a utilizar en la fumigación. Al momento de terminar del proceso de mezclado, se enciende la bomba eléctrica, que introduce la mezcla desde el recipiente al tanque que se encuentra con agua. La bomba hidráulica genera una presión de fluido, generalmente se utiliza aceite, con el objetivo del

¹¹ Gianino , Rosario. «Google Patents.» Portable home and garden sprayer, power unit. Patent No. 5,931,207. 05 de marzo de 1997. (último acceso: 18 de Septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2qeXQ3j>).

accionamiento de los actuadores, que mueven el brazo bastidor, y la bomba de pulverización del rociador.¹²

Figura 6: Sistema de fumigación de precisión acoplado en un tractor.



Fuente: Weddle, Kenneth E. Crop sprayer having offset frame which creates mounting space in which suspension assembly is located. Recopilado el: 18 de septiembre de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2EDUvET>).

4.2 TIPOS DE CONTROL DE ASPERSIÓN

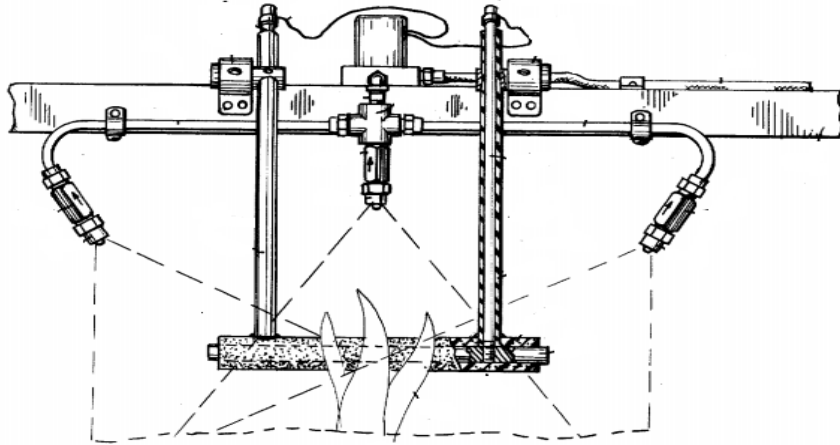
Los dispositivos de control de aspersión son aquellos que dosifican el plaguicida en un sistema de fumigación, el mecanismo de funcionamiento puede ser tanto mecánico como electrónico.

4.2.1 Sistema de Aspersión por Solenoide. En la figura 7 se observa el funcionamiento, en donde, en el momento que la hierba toca el sensor, que comprende un brazo de sonda conductora eléctricamente ajustable, adaptada para contactar dichas plantas acopladas a circuitos eléctricos, genera una señal eléctrica, abriendo una válvula accionada por solenoide que permite que el material de tratamiento fluya desde un tanque de almacenamiento presurizado a través de conductos a boquillas de pulverización que dispensan el material de tratamiento sobre la planta. La circuitería incluye medios por los cuales la válvula accionada por solenoide se mantiene abierta durante un tiempo mínimo predeterminado para asumir el tratamiento adecuado de la planta.¹³

¹² Weddle, Kenneth E. "Crop sprayer having offset frame which creates mounting space in which suspension assembly is located." U.S. Patente No. 6,056,210. 2 mayo 2000. (último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2EDUvET>).

¹³ Allen Jr, John Clarence. "Automatic spot sprayer." U.S. Patent No. 3,959,924. 1 junio 1976. (último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2JbASCx>).

Figura 7: Sistema de fumigación de precisión acoplado en un tractor.



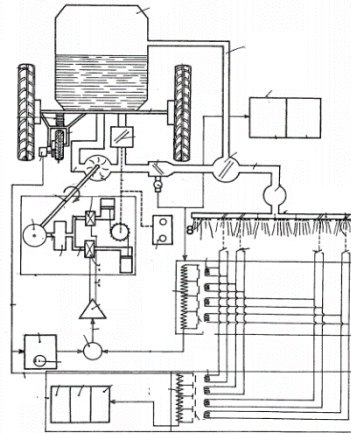
Fuente: Allen Jr, John Clarence. Automatic spot sprayer. Recopilado el: 18 de septiembre de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2JbASCx>).

4.2.2 Distribuidor de Aspersión acoplado a Tractor. Otro tipo de dispositivo móvil de distribución variable para la fumigación de cultivos está equipado con dispositivos para regular el flujo a fin de garantizar que este sea constante de líquido por unidad de área de la velocidad de desplazamiento del aparato, este flujo constante es posiblemente diferente, dependiendo del producto a distribuir. El distribuidor está compuesto por un sistema de suministro de flujo constante, un sistema de distribución de flujo variable, y un regulador de flujo que controla los dos elementos ya mencionados.

Este distribuidor es el más sofisticado, ya que, se compone de diferentes elementos que permiten una mejor dosificación de flujo, uno de estos es el sensor de aspersión, el cual, consta de una bobina que se activa o se desactivan los relés, dependiendo de la cantidad de fluido que se aplica, los relés están conectados en paralelo a una resistencia y esta conecta el caudalímetro a un comparador, formando un medio divisor de voltaje que reduce la tensión conforme al número de secciones del sistema en servicio. Al comparador se conecta la entrada de datos de un sensor de velocidad y la señal de los sensores de aspersión ya mencionados, a la salida del comparador la señal es amplificada, para controlar las electroválvulas de flujo. Las electroválvulas controlan el flujo de aire que inyecta un compresor a unos actuadores, que accionan una válvula de realimentación, que devuelve el exceso de flujo de líquido al tanque. Seguido de la tubería del Caudalímetro, se encuentra la válvula de derivación, la cual posee una entrada y dos salidas,

controlando el flujo de líquido dependiendo del número de boquillas de aspersión que se instalan en el distribuidor (véase figura 8).¹⁴

Figura 8: Distribuidor líquido implementado en el pulverizador.



Fuente: Lestradet, Maurice CJ. Liquid distributing apparatus and in particular a fertilizer or insecticide sprayer. Recopilado el: 18 de septiembre de 2018. Disponible en: (<http://bit.ly/2q6HR79>).

4.2.3 Sistema de Aspersión Múltiple. Las fumigadoras son dispositivos diseñados para la pulverización de agroquímicos, permiten una aspersión efectiva del mismo en los cultivos. Para los cultivos cuya área no es mayor a 1 hectárea, se emplean fumigadoras de espalda o mochila, cuyas ventajas están en el costo de adquisición, facilidad de operar y su amplia aplicabilidad. Actualmente, se han implementado fumigadoras de espalda con motor eléctrico, que mejoran la calidad de trabajo con respecto al esfuerzo que opera el operador. Shigueaki Sasaki diseñó un pulverizador de mochila eléctrica, mediante el uso de cuatro boquillas de pulverización planas, teniendo en cuenta, las siguientes variables: flujo y presión del líquido, duración de la carga de la batería, rotación del eje y ruido de la bomba”.¹⁵ “Otro tipo de pulverizadora¹⁶ diseñada también por Shigueaki es la solar fotovoltaica de mochila, cuyo objetivo yace en mejorar la calidad de pulverización y minimizar el trabajo físico para el operador, solucionando también los inconvenientes sobre la

¹⁴ Lestradet, Maurice CJ. "Liquid distributing apparatus and in particular a fertilizer or insecticide sprayer." U.S. Patente No. 4,202,498. 13 mayo 1980. (último acceso: 18 de septiembre de 2018). Disponible en: (<http://bit.ly/2q6HR79>).

¹⁵ Shigueaki Sasaki, Robson, et al. "Desempeño operacional de un pulverizador costal eléctrico." *Pesquisa Agropecuaria Tropical* 43.3 (2013). (último acceso: 22 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2PmV4Hq>).

¹⁶ Ibid., "Development of a solar photovoltaic backpack sprayer/Desenvolvimento de um pulverizador costal eléctrico fotovoltaico." *Comunicata Scientiae* 5.4 (2014): 395. (último acceso: 22 de septiembre de 2018). Tomado en: (<http://bit.ly/2q5SmHJ>).

duración y carga de las baterías, ya que esto, se consideraba una problemática, debido al amperaje de consume la bomba en su funcionamiento y a su vez, el tamaño de la batería, que al ser más grande, permite mayor autonomía, pero también aumenta el esfuerzo para el operario en el momento de portar la máquina.

4.2.4 Sistema de Electrización de Gotas en Aspersión. Un método de pulverización implementado por “Ronaldo Goulart, es la electrostática, que consiste en electrizar las gotas con cargas eléctricas, creándose un campo eléctrico capaz de aumentar la atracción de las gotas por las plantas, estas gotas serán aplicadas mediante un pulverizador neumático, al que se le implemento una bobina, encargada de electrizar las gotas, y funciona con una fuente de 12 voltios.¹⁷ Otro dispositivo más autónomo son el sistema de fumigación semi-automática por medio del control inalámbrico de un vehículo, el cual, controla y elimina las plagas que afectan los invernaderos, adaptándose también, a las necesidades o tipo de plaga que afectan. Así mismo, el vehículo a medida que se desplaza, realiza un mapeo de la zona a fumigar y lo almacena en una memoria, de modo que, servirá a futuro para el control autónomo del procedimiento de fumigación que se realiza en dicho invernadero, minimizando el dominio del dispositivo por parte del usuario, protegiéndolo de los agroquímicos tóxicos.¹⁸

Por otro lado, en los dispositivos de fumigación la maleza no es el único enemigo que enfrenta los cultivos hoy en día, con respecto al reino animal, existen plagas que se alimentan de los frutos de los cultivos, afectando en cierto porcentaje la producción del mismo, este tipo de plaga animal suelen ser los roedores. Dicho esto, otra técnica interesante para el control de plagas, viene dada mediante circuitos electrónicos que generan frecuencias ultrasónicas variables, estas ondas generan perturbaciones auditivas a ciertos animales, dado el ejemplo, las ratas. El dispositivo permite cambiar las frecuencias de los transductores, de modo que las ratas no pueden aclimatarse en las mismas.¹⁹

¹⁷ Júnior, Ronaldo Goulart Magno, et al. "Desenvolvimento de um dispositivo eletrostático para pulverizador pneumático costal." *ENGENHARIA NA AGRICULTURA/Engineering in Agriculture* 22.1 (2014): 9-16. (último acceso: 22 de septiembre de 2018).

¹⁸ Peniche Ruiz, Larissa Jeannette, Jesús Benjamín Aragón Solís, and a. b. r. a. h. a. m. guerrero godoy. "aplicación móvil para fumigación semi-autónoma en invernaderos." (2016). (último acceso: 22 de septiembre de 2018). Tomado de (<http://bit.ly/2yvsedZ>).

¹⁹ Schulein, Joseph. "Electronic pest-control device having plural ultrasonic generators." U.S. Patente No. 3,893,106. 1 julio 1975. (último acceso: 22 de septiembre de 2018). Disponible en: (<http://bit.ly/2OFjwE6>).

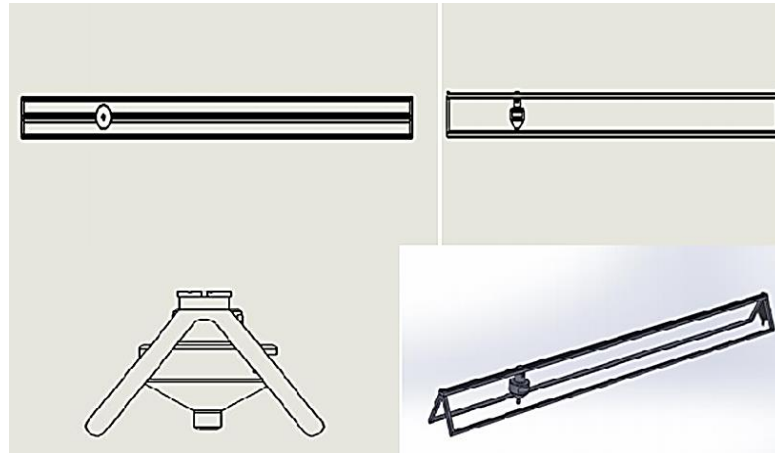
4.2.5 Diseño y prueba del sistema dinámico de rociado variable de protección de plantas UAV. Este dispositivo fue implementado con el fin de mejorar la uniformidad de la distribución de las gotas y evitar la repetición y falta de pulverización. Consiste en el diseño de un sistema de flujo basado en la modulación de ancho de pulso, el cual fue acoplado a un vehículo UAV (Vehículo Aéreo No tripulado). El efecto de pulverización se caracterizó por la deposición de gotitas, que se recolectó mediante papeles sensibles al agua y películas de poliéster a una velocidad de vuelo objetivo de 1.0 m/s, 2.0 m/s, 3.0 m/s, 4.0 m/s y 5.0 m/s. Los resultados mostraron que cuando se cambió la velocidad de vuelo de 0.8 m/s a 5.8 m/s, el flujo de pulverización fue capaz de igualar la velocidad con precisión en función del sistema de pulverización y el método de control, y la desviación promedio entre flujos prácticos y teóricos fue de 1.9%. El resultado de la investigación proporcionó un método para la optimización de la velocidad de vuelo y con un soporte teórico para mejorar la calidad de las operaciones de aviación.²⁰

4.2.6 Fabricación de aplicaciones de gota controlada para un uso eficiente de Pesticidas. El proyecto consiste en la implementación de un método para el control del tamaño de las gotas, utilizando la energía centrífuga, a partir de esto se crearon dispositivos en forma de discos, tazas y fundas cilíndricas o jaulas de malla de alambre y cepillos giratorios. Estos dispositivos utilizan la aplicación de gotas (CDA), que está desarrollada para abordar la necesidad de una mayor eficiencia cuando se aplican aerosoles de pesticidas en tasas de aplicación de volumen ultra bajo. Las condiciones de operación deben estar diseñadas para permitir una aplicación uniforme.²¹

²⁰ WANG Dashuai y otros. "Diseño y prueba del sistema dinámico de rociado variable de protección de plantas UAV". Universidad de Agricultura de China. Mayo del 2017. (último acceso: 01 de noviembre de 2018). (Disponible en: <https://bit.ly/2PBugmQ>).

²¹ Rakesh Nath y otros. "Fabrication of Controlled Droplet Application for Efficient use of Pesticides". Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India. 07 Julio 2017. Recopilado el: 01 de noviembre de 2018. (Tomado de: <https://bit.ly/2zpnwyk>).

Figura 9: Diagrama del Atomizador.



Fuente: Rakesh Nath y otros. "Fabrication of Controlled Droplet Application for Efficient use of Pesticides. Recopilado el: 01 de noviembre de 2018. (Tomado de: <https://bit.ly/2zpnwyk>).

Teniendo presente las investigaciones anteriores, el equipo a implementar, parte de una fumigadora convencional, en la que se le adapta un sistema de riego automático, este sistema consiste en una bomba electrónica, cuya función es el generar la respectiva presión del líquido a fumigar, el sistema posee un sensor de flujo, que censa el caudal de fluido que genera la bomba, de modo que, con el controlador automático, varíe la velocidad de la bomba, aumentando la autonomía con respecto al ahorro de energía que suministra la batería, ya que la bomba no se mantendrá siempre funcionando a RPM máximas.

5 MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO TEÓRICO

La fumigación es uno de los métodos más utilizados para el control y eliminación de las plagas. A continuación, se darán a conocer los componentes que conformarán la fumigadora automática, estos vienen a ser las electroválvulas, bomba de presión, sensores de flujo, y el sistema embebido.

5.1.1 Bombas. Las bombas de fluidos son dispositivos que permiten la circulación de un líquido por una guía de fluido, mediante una fuente de energía externa, la cual, genera una fuerza sobre el líquido por medio de diferentes métodos físicos, se compone de un motor que transforma la energía eléctrica o química en energía mecánica, y el dispositivo de bombeo, el cual puede ser por engranajes, turbina centrífuga, diafragma o pistón, métodos los cuales, fueron desarrolladas con el principio de Bernoulli. Cada tipo de bomba posee una característica particular.

5.1.1.1 Bombas Giratorias. El funcionamiento de las bombas hidráulicas giratorias consiste en que el fluido es atrapado en cámaras que se expansionan y contraen frecuentemente, de modo que en la expansión genera la entrada del líquido a la cámara y la contracción obliga al líquido a salir e ingresar al circuito. La bomba está compuesta por dos elementos circulares, los cuales, el elemento interior o de arrastre, gira dentro del elemento exterior. Estos componentes poseen centros diferentes, de modo que su separación varía de acuerdo al instante de revolución, generando así un intersticio o en caso contrario que viene siendo el punto de separación máxima.

El miembro interno al momento que gira, ocurre que cuando el engranaje se encuentra en la posición de la salida, genera un vacío que obliga al líquido que se encuentra en la entrada, alojarse en cámara al interior del engranaje fijo externo, en el momento que el engranaje interno sella el puerto de entrada del líquido, el movimiento del miembro desde el puerto de entrada al puerto de salida, disminuye el tamaño de la cámara que contiene la porción del líquido, forzando a que este sea expulsado por el puerto de salida con una presión estimada. El movimiento continuo del engranaje interno, genera un número de cámaras que varía de acuerdo a las

revoluciones que genera el motor, permitiendo también un caudal continuo y uniforme (véase figura 10).²²

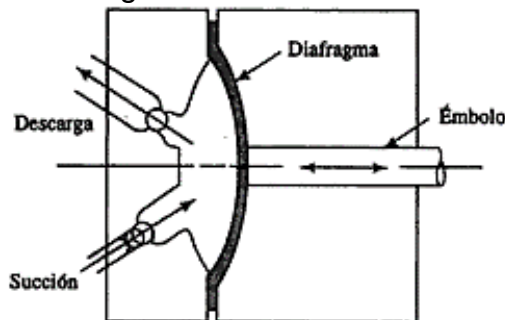
Figura 10: Esquema de una bomba giratoria.



Fuente: Brejcha, Mathias. Bombas Hidráulicas. Recopilado en: 02 octubre 2018.
Tomado de: <https://bit.ly/2NhEIAa>.

5.1.1.2 Bomba de Diafragma. El funcionamiento de la bomba de diafragma consiste en el movimiento reciproco de un diafragma mediante una varilla actuada por un motor, el movimiento del diafragma dentro de la cavidad permite el ingreso del líquido a la misma, y a su vez, el movimiento contrario lo expulsa con una presión que depende de la resistencia del material de diafragma y el torque que genera el motor a la varilla. Una ventaja con este tipo de bomba es que el fluido no es contaminado, debido a que el único contacto que realiza es con el diafragma (véase figura 11).²³

Figura 11: Bomba de Tipo Diafragma.



Fuente: Mott, Robert L. «Bomba de Diafragma. Recopilado en: 02 octubre 2018.
Disponible: (<https://bit.ly/2DND444>).

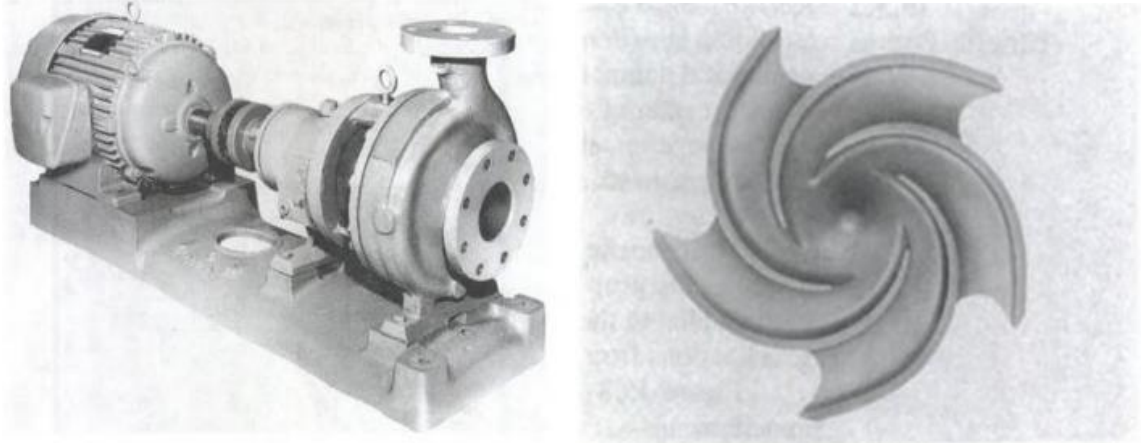
²² Brejcha, Mathias. «Bombas Hidráulicas.» En Los Cambios Automáticos, de Mathias Brejcha, Bogotá: Reverté, 1978. p.141. Disponible en: (<https://bit.ly/2NhEIAa>).

²³ Mott , Robert L. «Bomba de Diafragma.» En *Mecanica de Fluidos*, de Robert L Mott, Mexico: Pearson, 1996. p.413. Disponible: (<https://bit.ly/2DND444>).

5.1.1.3 Bombas Cinéticas. Las bombas cinéticas funcionan mediante la acción giratoria de un impulsor, este impulsor se encuentra dentro de una carcasa la cual posee una entrada en la parte frontal del eje el impulsor, y la salida que se encontrara en cualquier punto tangente del impulsor, se recuerda que el impulsor, generalmente tiene forma circular, como se muestra en la figura 12. El mecanismo consiste en que, la carcasa donde se aloja el impulsor, es llenada de agua mediante un tornillo que purga, la manguera de entrada es llenada de agua o el líquido propulsar, esto, con el objetivo de eliminar el aire que se encuentra en la carcasa y la manguera.

Al momento de encender el motor, el movimiento de las paletas en espiral del impulsor, impulsa el agua por medio de fuerza centrífuga a las paredes laterales de la carcasa, así mismo el giro de la turbina, impulsa el agua que se encuentra con cierta velocidad en los bordes, hacia la salida. Este tipo de bombas pueden desarrollar un alto caudal de flujo de líquido dependiendo también del tamaño de la turbina y la potencia del motor, a su vez, son dispositivos económicos ya que su mecanismo es muy básico, así mismo, como principal desventaja, se encuentra en el mecanismo, el cual, no permiten desarrollar altas presiones.²⁴

Figura 12: Motor acoplado a la unidad de la bomba, Impulsor.



Fuente: Ibíd., p.413.

5.1.2 Sensores de Flujo. Los sensores de flujo son aquellos dispositivos que, mediante los principios de funcionamiento a los cuales fueron diseñados, permiten sondear o determinar el caudal de un flujo de líquido es específico. Existen varios

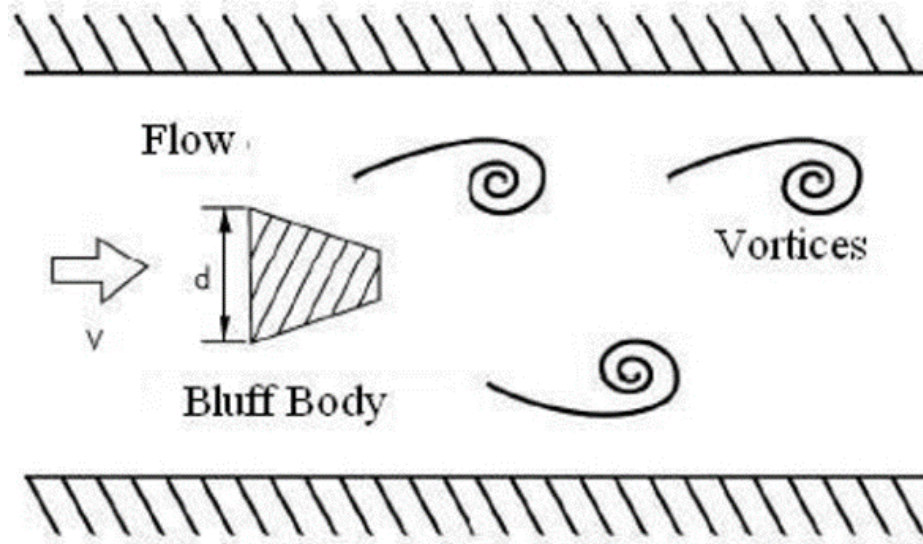
²⁴ Ibíd., p.413

5.1.2.1 Medidor de Flujo de Turbina. Consiste en un conducto en forma cilíndrica, por el cual el flujo de líquido circula, así mismo, este posee en su interior una turbina, que gira a una velocidad en proporción a la del fluido que circula. El movimiento de la turbina acciona una bobina magnética, generando un pulso de voltaje, el cual es procesado en datos de flujo volumétrico por un contador, medidor de frecuencia o similar (ver figura 13).²⁵

5.1.2.2 Medidor de Vórtice. Consiste en que en una tubería por donde pasa el fluido, se le instalan en el medio una sonda, por la cual el flujo de líquido la atravesara, esto, con el objetivo de medir la frecuencia con la que atraviesa el cuerpo, estos datos de frecuencia son proporcionales a la velocidad de flujo. El cuerpo obstructor varia de forma de acuerdo al fabricante, y algunos medidores cuentan con sensores de presión que detectan las variaciones de flujo en los laterales del cuerpo obstructor y generan pulsos de voltaje alternos, como de observa en la figura 14.²⁶

²⁶ *Ibíd.*, p.487.

Figura 14: Diagrama del comportamiento del flujo con respecto a obstáculo.

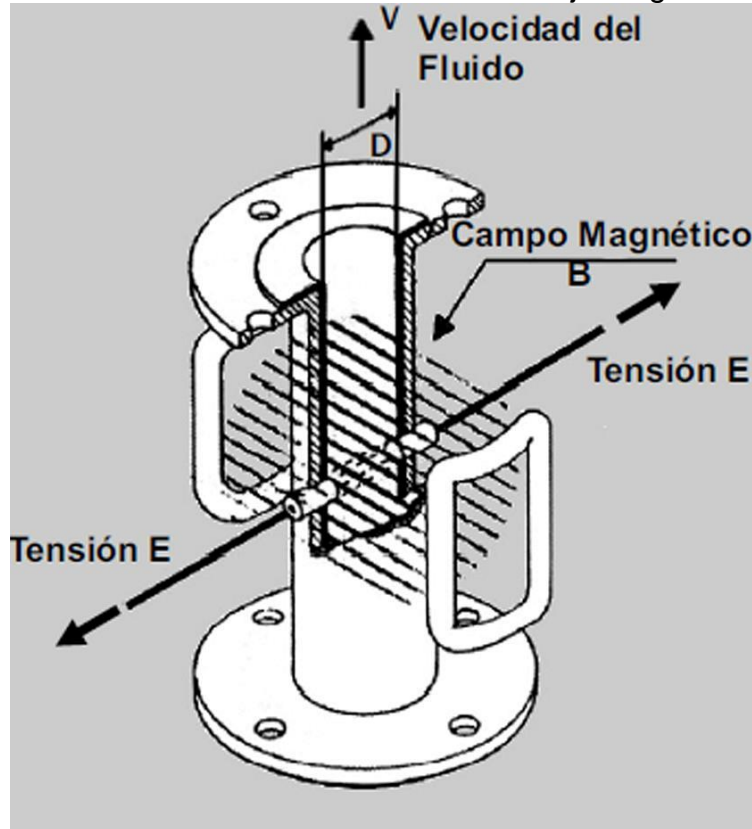


Fuente: Ibíd., p.487.

5.1.2.3 Medidor de Flujo Magnético. Para que este medidor cumpla con su objetivo, el líquido a medir debe cumplir con cierto grado de conductividad, así mismo, la ventaja de este medidor con respecto a los ya mencionados, es que no utiliza ningún tipo de mecanismo que obstruye el paso del líquido. Como se observa en la figura 15, su funcionamiento consiste en el uso de un material no conductor alineado en el tubo por donde circula el fluido, dos bobinas electromagnéticas, y dos electrodos montados y separados 180° de la pared del tubo. En el momento en que un líquido conductor circula por el tubo, el cual posee un campo electromagnético, se induce un voltaje el cual será directamente proporcional a la velocidad del fluido. Las variaciones del voltaje se analizan, para ser convertido en medida de caudal o velocidad de líquido.²⁷

²⁷ Ibíd., p.487.

Figura 15: Diagrama de funcionamiento del medidor de flujo magnético.



Fuente: Ibíd., p.487.

5.1.3 Boquillas para Pulverización























Las boquillas de pulverización, son componentes diseñados para convertir un fluido que se encuentra sometido a una cierta presión, en partículas diminutas, esto con el fin de mejorar la aspersión de un fluido sobre una superficie en específico. A continuación, se presentan los tipos de boquillas a utilizar, teniendo en cuenta el ángulo y tamaño de aspersión, presión de trabajo, material de fabricación, tipo de fumigadora en la que se utiliza, y cultivos en la que aplica.

En la presente tabla 1, se observa las especificaciones de uso ya mencionados, de las boquillas a utilizar, las referencias de las boquillas que se observa en la tabla, son aquellas de uso universal o que permiten utilizarse para todo tipo de cultivo según su producto.

Se presentaron 5 tipos de boquillas, las cuales tiene en común el que se puedan implementar en una fumigadora manual, tal como se puede observar en la tabla 1,

en la figura 16 se observa las convenciones de la tabla 1, con respecto al tipo de dispositivo a que se le implementa y característica del tamaño de la gota. Finalmente, en la Figura 17, se observa los respectivos caudales de líquido que proveen las boquillas con respecto al tipo y la presión del líquido que se le aplica.

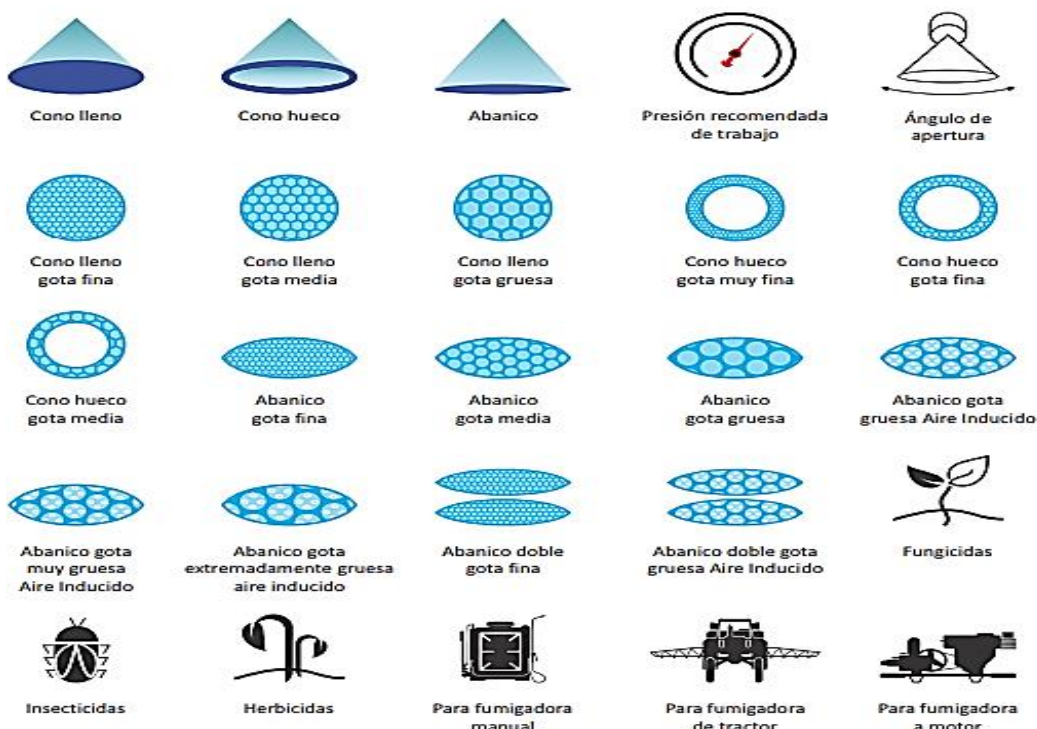
Tabla 1: Especificaciones de uso de las boquillas.

REFERENCIA BOQUILLA	TP	XR	HC	AITXA/B	TG
FOTOGRAFÍA BOQUILLA					
ÁNGULO 	 40° - 110°	 80° - 110°	 80°	 80°	 90°
TAMAÑO DE GOTA	 GOTA FINA	 GOTA FINA	 GOTA MUY FINA	 GOTA FINA	 GOTA FINA
RIESGO DE PERDIDA O DERIVA	ALTA	MUY BAJA	ALTA	MEDIO	MEDIO
PRESIÓN DE TRABAJO 	30 - 60 Libras/pulg ²	15 - 60 Libras/pulg ²	15 - 150 Libras/pulg ²	60 - 250 Libras/pulg ²	45 - 75 Libras/pulg ²
MATERIAL DE FABRICACIÓN	CERÁMICA LATÓN, POLÍMERO, ACERO INOX.	ACERO CERÁMICA POLÍMERO	DELRI N	CERÁMICA	ACERO INOXIDABLE LATÓN
APTA PARA FUMIGADORA MANUAL / TRACTOR / MOTOR					
IDEAL PARA APLICACIÓN EN	USO UNIVERSAL (MANEJESE CON CUIDADO POR SU GOTA FINA)	USO UNIVERSAL OPTIMO RESULTADO CON VÁLVULA REGULADORA	TODOS LOS CULTIVOS	TODOS LOS CULTIVOS	TODOS LOS CULTIVOS CON FOLLAJE DENSO, PIÑA

Fuente: ibíd., p.33.

Figura 16: Convenciones de la Tabla 1.

Convenciones



Fuente: RoyalCondor, Técnicas de Aplicación, Boquillas y Accesorios para Fumigación. Recopilado en: 25 de septiembre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2Pqimsm>).

Figura 17: Caudales de las boquillas tipo abanico y tipo cono.

COLOR BOQUILLA	REFERENCIA	FILTRO						
			29 psi	43,5 psi	58 psi	72,5 psi	87psi	101,5 psi
NARANJA	01	100	320	390	450	500	550	600
ROJO	04	50	1290	1580	1820	2040	2230	2410

BOQUILLA	FILTRO						
COLOR		29 psi	43,5 psi	58 psi	72,5 psi	87 psi	101,5 psi
TX-VK6	50	327	393	448	496	539	579
TX-VK8	50	433	525	603	671	732	788
TX-VK18	50	968	1180	1370	1530	1670	1800

Fuente: ibíd., p.33.

5.1.4 Control automático. Los sistemas de control automático son un conjunto de dispositivos cuyo objetivo es cumplir una función o proceso, bajo uno o varios parámetros estipulados por el operador.

5.1.4.1 Sistemas de Control en Lazo Abierto. Los sistemas de control de lazo abierto son considerados sistemas no complejos, debido a que son sistemas que no satisfacen los parámetros de una función crítica, se componen de dos elementos, los cuales son el controlador y el proceso controlado como se observa en la figura 18. Su funcionamiento consta en que la señal entrante ingresa al controlador convirtiéndola en una señal actuante, la cual ingresa al proceso controlado, y como resultado se tiene una variable conocida como variable controlada, cuyo fin es ser acorde a los parámetros establecidos inicialmente.²⁸

Figura 18: Elementos de un Sistema de Control en Lazo Abierto.



Fuente: Infoagro. Fundamentos de los sistemas de control del riego y la fertilización. Recopilado en: 23 de octubre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2SFMSKa>).

5.1.4.2 Sistema de Control en Lazo Cerrado. Este tipo de sistema tiene como ventaja el controlar procesos que contengan estados críticos, ya que brinda variables de salidas más exactas. Este sistema aparte del controlador y el proceso controlado, utiliza un sistema de realimentación controlado generalmente por un sensor, con el fin de reducir el error entre la entrada de referencia y la salida del sistema, estabilidad, ancho de banda, ganancia global, perturbaciones y sensibilidad. La señal resultante de este tipo de sistema, la señal que proporciona el proceso controlado se realimenta y se compara con la señal inicial del controlador, enviando una señal actuante, que es proporciona a la diferencia de la señal de entrada y la salida a través del sistema para corregir el error (ver figura 19).²⁹

²⁸ KUO, B. (1996). Sistemas de Control en Lazo Abierto. En B. Kuo, Sistemas de Control Automático. p.9. México: Prentice Hall. Recopilado en: 23 de octubre del 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2z1gtM6>).

²⁹ Ibíd., p.10.

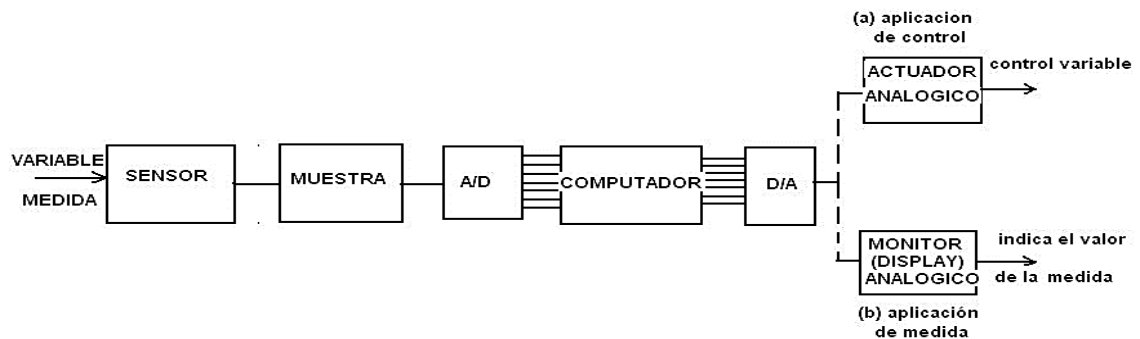
Figura 19: Diagrama de Bloques de un Sistema de control en Lazo Cerrado.



Fuente: Google Imágenes. Sistemas de control de lazo cerrado. Recopilado en: 01 de noviembre de 2018. Tomado de: (<https://goo.gl/images/bxHKL8>).

5.1.4.3 Control Digital. Se caracterizan por su óptimo desempeño, en la forma de productividad y beneficio máximo, en un costo y gasto de energía mínimo. Este tipo de controlador ha hecho posible la implementación de robots en cuanto a sus movimientos, en sistemas de optimización de la industria automotriz y en máquinas de uso doméstico. En un sistema de control digital como el de la figura 20, se compone por una parte de la configuración básica, y a la salida de la planta se tiene una señal en tiempo continuo. Cuenta con un computador que analiza las señales en forma digital, y convertidores de señales análogas-digitales y viceversa, ya que los actuadores y sensores por lo general emiten o entienden señales análogas. Para la configuración de los controles digitales, se tienen ecuaciones y operaciones lógicas complicadas, con mayor variedad de leyes de control.³⁰

Figura 20: Diagrama de Bloques de un sistema de control digital.

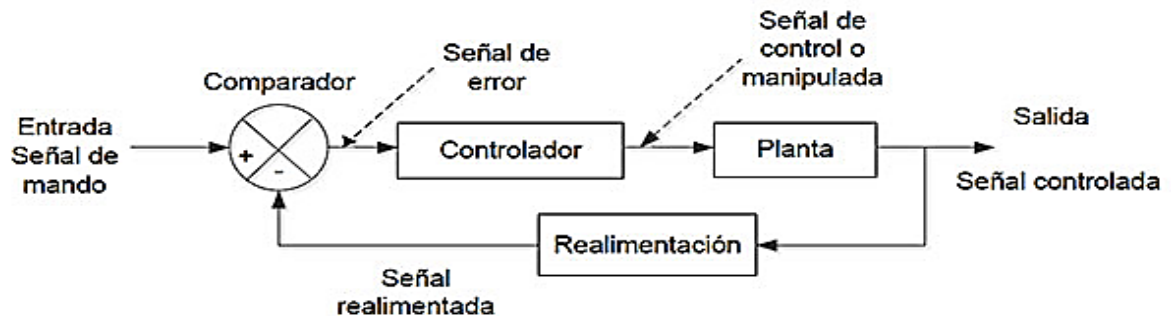


Fuente: Google Imágenes. Inyección Electrónica. Recopilado en: 01 de noviembre del 2018. Tomado de: (<https://goo.gl/images/rpWeHh>).

³⁰ Quintero, C., Oñate López, J., & Jiménez, J. (2014). Sistemas de Control Digital. En C. Quintero, J. Oñate López, & J. Jiménez, Control Automático Aplicado (pág. 129). Barranquilla: Universidad del Norte. Recopilado en: 23 de octubre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2AozZUy>).

5.1.4.4 Control Análogo. El dispositivo de control más básico, el cual consiste en un procesador o controlador análogo, una planta y un sistema de realimentación. Tiene como desventajas las perturbaciones externas sobre el proceso y los errores presentados con el sistema de medición o sensor (ver figura 21).³¹

Figura 21: Diagrama de Bloques de un sistema de control analógico.



Fuente: Google Imágenes. SISTEMA DIDÁCTICO DE CONTROL DE PRESIÓN. Recopilado en: 23 de octubre del 2018. Tomado de: (<https://goo.gl/images/2kkqGS>).

5.1.4.5 Controlador PID. Es un mecanismo de control que funciona mediante lazo cerrado, con el fin de regular variables como presión, temperatura, velocidad, entre otros. Su función es calcular la diferencia entre la variable de entrada con respecto a la de salida, y a partir de esta, generar una acción de control. Este tipo de controlador se compone de tres parámetros fundamentales, Ganancia proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D).³²

- **Acción de Control Proporcional (P).** Consiste en que la salida del controlador es proporcional al error, y depende de una ganancia proporcional ajustable. Este tipo de controlador permite controlar cualquier planta estable, pero como desventaja posee un desempeño limitado y un error en régimen permanente.
- **Acción de Control Integral (I).** Consiste en que la salida del controlador es proporcional a error acumulado, generando un modo de control lento, se

³¹ Otello Baurone, A. (1991). El computador como elemento de Control. En A. Otello Baurone, Control por Computadora (pág. 4). Barcelona: Marcombo. Recopilado en: 23 de octubre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2q7ilyB>).

³² García, P. (5 de septiembre de 2013). Franklin Electric. Obtenido de ¿Qué es el control PID? Recopilado en: 23 de octubre del 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2Seu1wy>).

caracteriza en que, para una referencia constante, o con perturbaciones, se mantiene en cero el error permanente.

- **Acción Control Derivativo (D).** Consiste en emitir una acción predictiva, de modo que responde a la velocidad del cambio de error, generando una corrección, evitando que la magnitud del error se vuelva demasiado grande.
- **Acción de Control Proporcional - Integral (PI).** El control proporcional permite que haya error, de modo que se debe tener un control diferente de cero, y para el caso del control integral, se pueda definir el control de una señal en creciente y decreciente, manteniendo el error relativo en cero.
- **Acción de Control Proporcional - Derivativo (PD).** Para esta acción, el control proporcional se caracteriza de hacer más rápida la acción del control, mediante la acción de previsión, por otro lado, como desventaja se tiene que, al amplificar las señales de ruido, genera saturación en el actuador. El control proporcional derivativo no se ha de usar solo, ya que funciona solo por lapsos de tiempo y en periodos transitorios. El controlador PD permite obtener un sistema de alta sensibilidad, el cual responde a la velocidad del cambio de error, y produce una corrección significativa al momento en que la magnitud del error aumente exponencialmente.³³

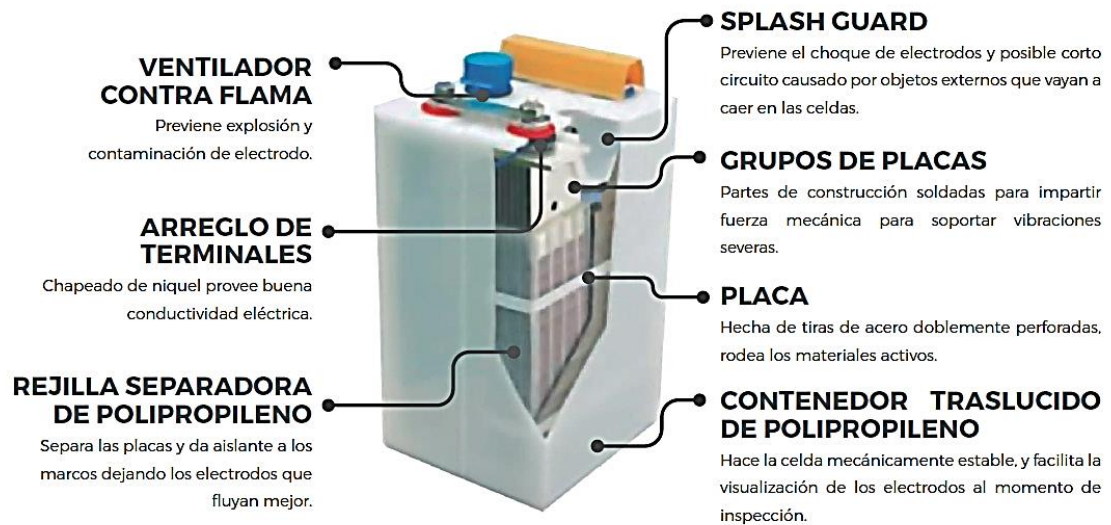
5.1.5 Baterías. Todo sistema o dispositivo electrónico requiere de una fuente de alimentación, la cual, proporciona la potencia necesaria (voltaje y corriente) para el funcionamiento del sistema, así mismo, si el dispositivo a implementar, ha de ser portátil, requiere de una fuente del mismo tipo, comúnmente se utilizan las baterías. Estos componentes consisten en sistemas de almacenamiento, las cuales, mediante la reacción de electrodos, convierten la energía química en energía eléctrica. Las baterías se pueden clasificar según el componente que se utiliza como electrodo, así mismo, al tener características diferentes, hace de la batería más efectiva y rendidora. Los tipos de batería según su composición, se presentarán a continuación.

5.1.5.1 Níquel y Cadmio. Las baterías de Níquel y Cadmio se caracterizan por demandar una elevada intensidad de corriente con una menor resistencia interna, así mismo, permite también que la tensión entre los bornes de salida permanezca constante hasta que la batería se encuentre completamente descargada. Este tipo de acumulador surgió de la modificación de una batería diseñada por Edison en 1904. Esta batería se compone de una caja contenedora

³³ Mazzone, V. (2002). Controladores PID. Buenos Aires: Universidad Nacional de Quilmes. p.1-2. Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2O0tkmY>).

con ventilación por aire, un conjunto de celdas independientes, las cuales son unidas por una barra con alta conductividad. Externamente se tiene que la batería se compone de los bornes de salida y un tapón de llenado que funciona como válvula de alivio en caso de sobrepresiones por temperatura. En el interior, para identificar las placas positivas de las negativas, las positivas se impregnan con hidroxilo de níquel, y las negativas con hidroxilo de cadmio. Se tiene que en la reacción química que ocurre en la carga o descarga de la batería, el hidroxilo de potasio no interviene, por lo que la densidad del electrolito permanece inalterada. En el caso de la descarga el electrolito penetra entre las placas disminuyendo su nivel (ver figura 22).³⁴

Figura 22: Acumulador de Níquel – Cadmio.



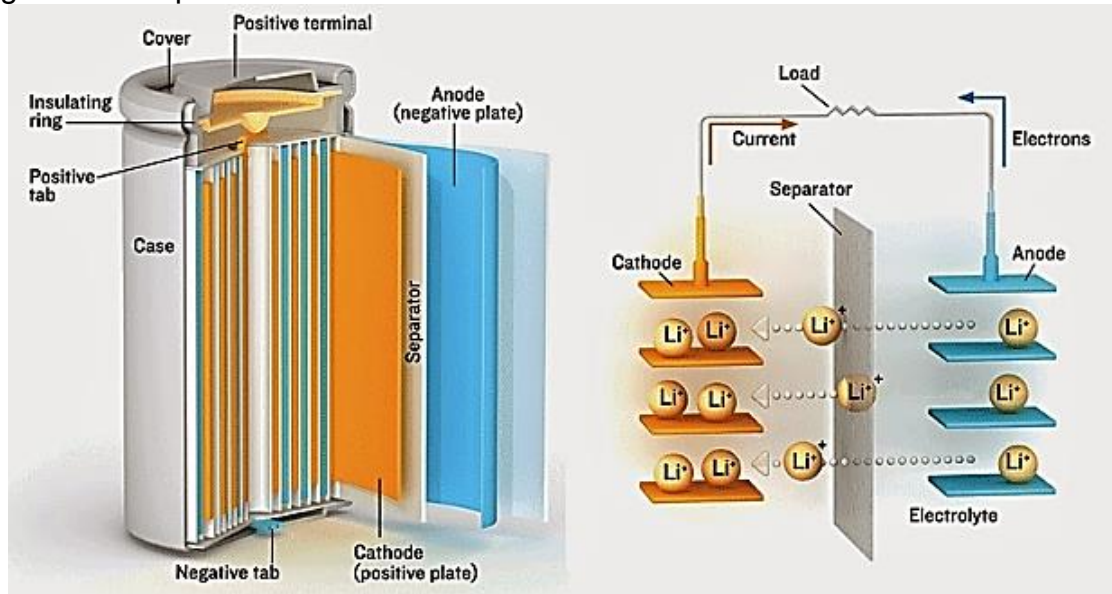
Fuente: Google imágenes. BATERÍAS Níquel Cadmio POWER MX. Recopilado en: 29 de septiembre del 2018. Tomado de: (<https://goo.gl/images/RyNEg2>)

5.1.5.2 Ion Litio. Las baterías de ion litio, presente en la figura 23, son comúnmente utilizadas en computadores portátiles, tienen la ventaja de recargarse cualquier cantidad de veces, y se componen de un electrolito formado por oxido de polipropileno o polietileno, mezclado con sales de litio las cuales cumplen con un proceso de fundido- enfriado. Como resultado, se tiene un material con una textura

³⁴ Martínez, Jesús. «Sistemas Eléctricos y Electrónicos de las Aeronaves.» En Pilas Níquel - Cadmio, de Jesús Martínez. Madrid: Thomson Paraninfo, 2007. p.15. Recopilado en: 17 de octubre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2RFaOUr>).

gomosa, el cual, sirve como buen conductor de iones, y su baja densidad de masa, le da mayor densidad de energía. En las baterías, los iones de litio del electrodo negativo se depositan en una rejilla de grafito mediante un proceso eléctrico reversible.

Figura 23: Esquema de una Batería de Ion de Litio.



Fuente: GOOGLE IMÁGENES. Batería de Ion-litio. Recopilado en: 03 octubre 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2RULKcc>).

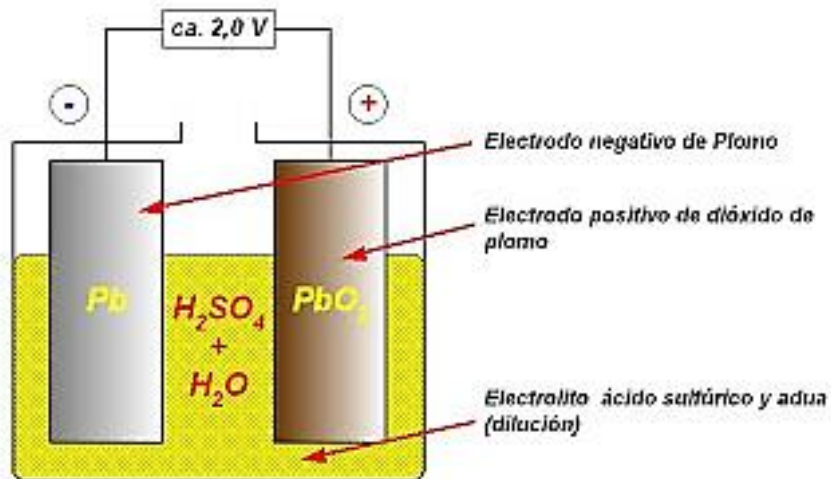
5.1.5.3 Polímero de Litio. Comúnmente conocidas como baterías LiPo, son baterías recargables usadas en aplicaciones que requieren corrientes superiores a 1A, y de peso considerable y de fácil acople en cuando a dimensiones. Poseen una capacidad de descarga de 1000 mA en una hora, y poseen una resistencia interna entre los 0.002 a 0.006 ohm, que podría aumentar con respecto al tiempo de servicio de la batería. Una desventaja de estas, es el riesgo que se tiene en poderse incendiar o explotarse, también requiere de cuidados en el proceso de carga o almacenamiento para prologar su vida útil, como también el someterla a demandas de cargas de corriente superiores a la especificada, genera inflamamiento por temperatura de la misma.³⁵

5.1.5.4 Plomo. El funcionamiento de estas baterías consiste en sumergir el elemento Plomo en ácido sulfúrico diluido, cuya función será de ser el electrodo, por

³⁵ DYNAMO, electronics. Baterías LiPo, Características y Cuidados (en línea). 29 de junio de 2017. Recopilado en: 22 de octubre de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2yrnt5W>).

el electrolito, se transfieren los iones de plomo por efecto de la presión de disolución. Al traspaso de los iones de plomo positivos, solo quedarían las cargas negativas en el electrodo, convirtiéndose eléctricamente de neutro a tener potencial negativo, con respecto al electrolito, al instante en que se encuentran dos electrodos de diferente composición, se cargan con diferentes potenciales con respecto al electrolito, esta diferencia de potencial viene a ser el voltaje de la batería (ver figura 24).³⁶

Figura 24: Esquema de una Batería de Plomo Acido.



Fuente: GOOGLE IMÁGENES. Batería de plomo Acido para uso industrial. Recopilado en: 03 octubre 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2NUkbfO>)

³⁶ BOSCH, ROBERT «Baterías.» En Baterías de ion de Litio, de Robert Bosch. p.14 (en línea). Alemania: Bosch, 2000. Recopilado en: 22 de octubre del 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2PKAqOd>).

5.2 MARCO CONCEPTUAL

Los agroquímicos son sustancias sintéticas, que permiten mejorar la eficiencia y protegen los cultivos agrícolas, ya que controlan, disminuyen o eliminan una plaga, y aceleran el crecimiento y maduración del fruto. Los agroquímicos se utilizan para acrecentar la fertilidad del suelo, optimizar el beneficio agrícola y perfeccionar la calidad de la cosecha.³⁷

5.2.1 Tipos de Agroquímicos. Generalmente, el objetivo de los agroquímicos es suministrar nutrientes a las tierras agrícolas, eliminar insectos y microorganismos que lo afecten de manera negativa, controlar y excluir todo tipo de malezas incluidos hongos y algas de los cultivos. Para cumplir cada uno de los propósitos, existen tipos de agroquímicos, los cuales, se identifican por destruir una plaga en específico. Los tipos de agroquímicos son:

- **Herbicidas:** Es un elemento fitosanitario que se utilizan para eliminar y evitar el crecimiento de plantas no deseadas en los cultivos. Para cada tipo de cultivo, se aplica un herbicida específico, debido a que este agroquímico, al no aplicarse la referencia adecuada, podría conllevar a daños en la planta, y hasta pérdida del cultivo. La maleza en los cultivos es un tipo de planta no deseada, la cual absorbe los nutrientes y el agua de la planta perteneciente al cultivo, a tal punto, que esta disminuye su producción y calidad en su fruto. Como consecuencia, también se tiene que la maleza absorbe los fertilizantes aplicados al cultivo lo que le generará aumento de tamaño, y en algunos casos invadir la porción del suelo y área de luz solar de la planta cultivada, impidiéndole el crecimiento y desarrollo, hasta que esta muere.
- **Insecticidas:** Importantes para la eliminación de insectos, que perjudican la salud del cultivo, estos se caracterizan en cuando al tipo de insecto a eliminar, por otro lado, este tipo de agroquímico, se debe ir rotando con respecto a su fabricante, ya que las plagas suelen, volverse inmunes, al momento de usar la misma referencia del insecticida.
- **Acaricidas:** Es un químico similar al insecticida, pero su objetivo es la eliminación de ácaros, tipo de arácnido-parasito que disminuye el rendimiento de una planta, hasta destruirla. Algunos acaricidas más utilizados en la agricultura son aquellos en cuya composición contienen azufre, ticloroetanol, fosfatos, y en caso de los orgánicos que contienen Hexitiazox y Fenbutestan.

³⁷ Flores. Agroquímicos. 2014. Recopilado en: 25 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2O9jZJA>).

- **Fungicidas:** Se utiliza para la eliminación de todo tipo de hongos y mohos que se genera en un cultivo. Un factor a tener en cuenta, es que este tipo de agroquímico deber ser dosificado bajo el rango establecido, ya que, al aplicarlo en exceso, puede generar daños fisiológicos en la planta, seres humanos y animales. Este agroquímico se compone principalmente de cobre, y su importancia en el cultivo es en el control de enfermedades, mejorar el periodo de almacenamiento y calidad de las plantas y fruto, y en el caso del trigo, ayuda a eliminar las micotoxinas.³⁸
- **Nematicidas:** Son un tipo de agroquímico que se utiliza para la eliminación de filos parásitos, los cuales comprometen los frutos de los cultivos reduciendo la calidad de los mismos.
- **Rodenticidas:** Es un tipo de agroquímico cuya función es la eliminación de roedores, evitando la perdida de cultivos, como también la transmisión de enfermedades al ser humano.
- **Fertilizantes:** Son un tipo de componentes a base de minerales, cuya función es enriquecer el suelo, para mejorar la eficiencia de los cultivos.
- **Fitorreguladores:** Son sustancias fabricadas a base de hormonas vegetales, cuya función es regular el crecimiento de la planta, mediante el crecimiento de las raíces, tallo y hojas de la misma, aumentando su rentabilidad en la producción, así mismo, no son muy recomendables ya que, al momento en que la planta consume una alta cantidad de agua y nutrientes que el suelo no puede suministrar, se crea lo que se conoce como erosión.

³⁹

5.2.2 Control de flujo por Válvula vs Variación por Velocidad de la bomba⁴⁰.

En las industrias se tienen sistemas hidráulicos, cuya función es suministrar agua u otros líquidos de gran importancia para las fábricas, empresas, megaconstrucciones, entre otros. Los dispositivos que se encargan de circular el líquido deseado se conocen como bombas, y estas se componen de dos elementos fundamentales, el sistema de bombeo (turbina, diafragma, pistón) y el motor, el cual, generalmente suele ser eléctrico. Estas bombas representan el 20 % del consumo mundial de energía, y entre el 25% al 50 % del consumo de energía en las industrias, lo cual,

³⁸ Ibíd., p.47.

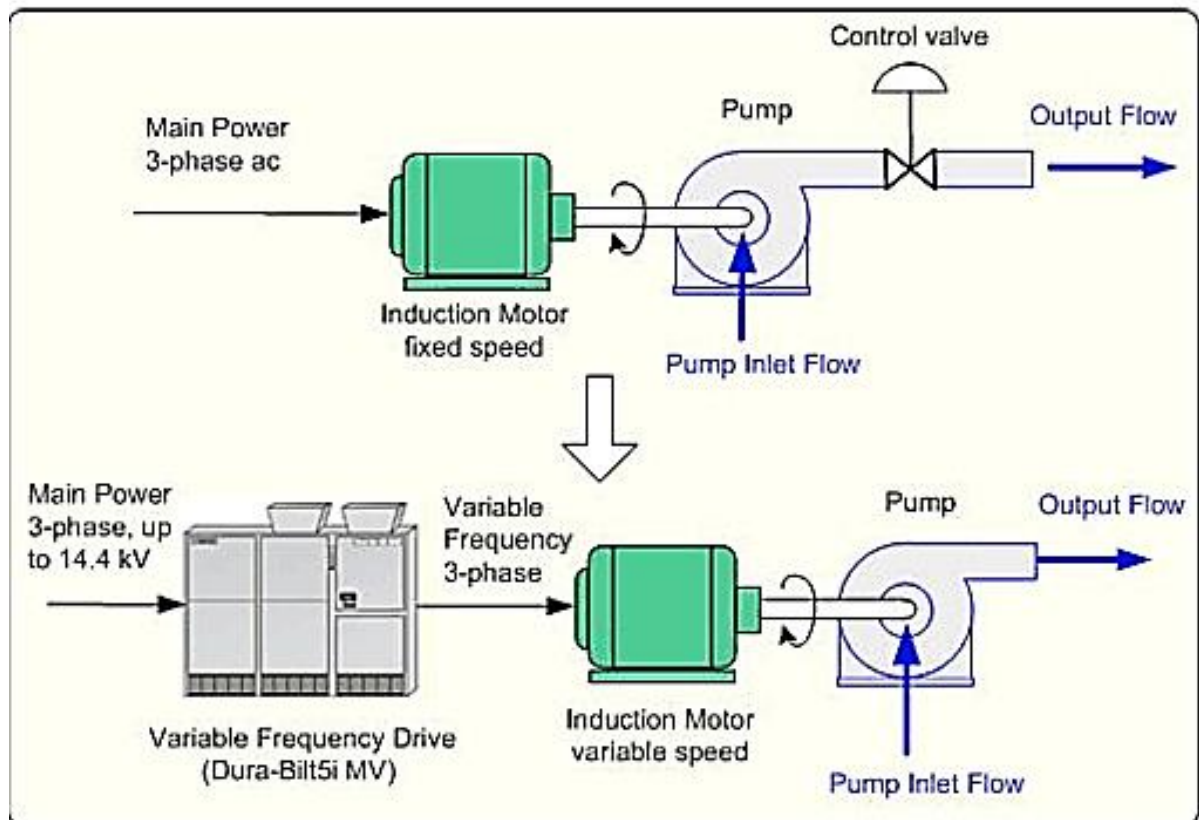
³⁹ Valencia, Universidad de. Los agroquímicos más utilizados. 10 de diciembre de 2015. Recopilado en: 25 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2Sd4bsJ>).

⁴⁰ Muhammad H Al-Khalifah, Gregory K. McMilla (2012). Control valve versus variable speed drive for flow control. ISA Automation Week. Recopilado en: 28 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2AwivMe>).

se considera uno de los costos más alarmantes para las empresas, y así mismo el ciclo de vida de los dispositivos, lo cual se ha de sumar costos por mantenimiento o reemplazo del mismo.

Existen sistemas y controles de bombeo presentes en la figura 25, que, mediante un adecuado diseño, reducen el tiempo de funcionamiento de la bomba, comúnmente conocidos como sistemas variables, posee una válvula de regulación de flujo, y pueden tener un sistema de recirculación de flujo, como también, un control de velocidad del motor, el cual genera un caudal deseado. Un punto a tener en cuenta es que el sistema de recirculación de flujo genera mayor consumo de energía, ya que, con este sistema la bomba se mantiene en un funcionamiento constante, aun cuando la válvula bypass recircula el flujo no deseado, o cuando se restringe la descarga de la bomba, así mismo, al utilizar una válvula de regulación, tiene desventajas como ser fuente de emisiones, taponamiento, adherencia, cavitación, y daños prematuros como la corrosión, erosión y fugas.

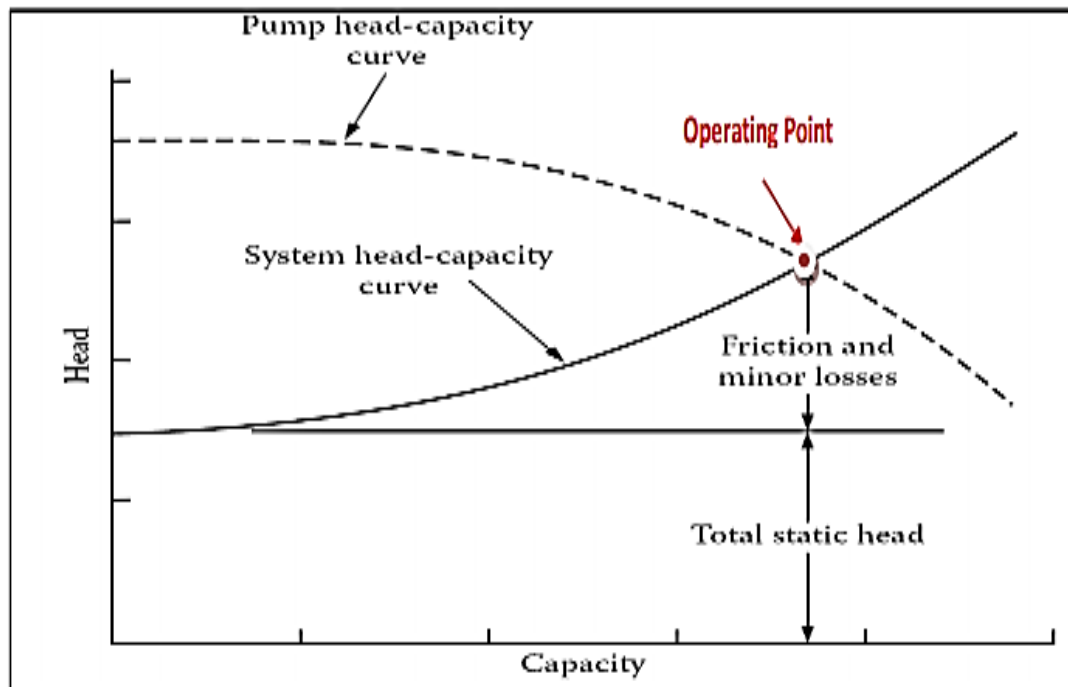
Figura 25: Control de Flujo con Válvula vs Control de flujo con VFD.



Fuente: TMEIC. Pump Flow Control. Recopilado en: 28 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2yFKTnE>).

El sistema de control de velocidad de la bomba evita las desventajas mencionadas, ya que no requiere de sistema de recirculación ni de válvula de regulación, y la velocidad del motor va a ser controlada, de modo que exija revoluciones altas o bajas en los periodos establecidos y según la demanda del sistema hidráulico. En este sistema, una de sus bases es la ley de Afinidad, la cual establece que la potencia del freno varía con el cubo de la velocidad de la bomba centrífuga, reduciendo así la presión de la bomba y a la par el consumo de energía, ya que esta se conserva. Como ventaja de este sistema, se tiene también la confiabilidad del sistema, rendimiento del proceso y aumento de la vida útil de la bomba (Véase figura 26).

Figura 26: Curva del sistema de una bomba constante.



Fuente: Muhammad H Al-Khalifah, Gregory K. McMillan. Control valve versus variable speed drive for flow control. Recopilado en: 28 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2AwVMe>).

Teniendo en cuenta la figura 26 se tiene una de curva del sistema, la cual representa la suma del máximo estática y el máximo dinámico de una tubería, contra el que necesita bombear. El máximo estático es una función de la diferencia de elevación entre la succión y la descarga y / o la contrapresión con respecto a la cual opera la bomba. El máximo dinámico representa las pérdidas por fricción del fluido que resulta de la tubería. El máximo superior representa la curva de freno. El trazado de la curva de la bomba y la curva del sistema se interceptan en un punto que se

llama el punto de operación. Este punto indica la relación entre el máximo y la capacidad a la que opera la bomba en el sistema, y proporciona el flujo máximo requerido.

En la mayoría de los casos, este punto de intersección no cumple con todos los requisitos del proceso cuando este se encuentra por debajo del punto de operación, por esto, el proceso requiere tasas de flujo y condiciones de carga variables, siendo necesario aplicar algún tipo de control en la descarga de la bomba o en el motor de la misma. El método más común de control de flujo es regular el flujo en el lado de descarga de la bomba, pero la opción más eficiente es regular el flujo de la bomba variando la velocidad del motor de la bomba. Para el control variable de velocidad de flujo de la bomba, se mencionarán dos métodos de control de velocidad existentes:

5.2.3 Variador de Velocidad por Frecuencia. Uno de los sistemas más comunes para el control de velocidad, tanto de un motor AC es la variación de la frecuencia, mediante un PLC, así mismo, y para el caso del motor DC, se utiliza la modulación por ancho de pulso (PWM), estos sistemas constan de un rectificador, inversor, interfaz del operador y otros microprocesadores de control y diagnóstico. Su funcionamiento consta en que el voltaje Ca es rectificado y filtrado, de modo que se convierte en un voltaje CC, este somete a una inversión para convertirse en un voltaje de frecuencia variable, cuya frecuencia es proporcional a la señal de entrada del variador, la salida de la onda cuadrada del PWM se filtra para convertirse en una señal sinusoidal, con menos cantidad de ruido y un factor de potencia más alto y mayor rendimiento a bajas velocidades.

5.2.4 Requerimientos del flujo de agroquímicos. Para el mantenimiento adecuado de un cultivo, se debe plantear o diseñar un programa para el control de plagas del mismo, en este, el uso de plaguicidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas) es bastante común debido a su gran porcentaje de efectividad. En el comercio de agroquímicos se pueden encontrar diferentes plaguicidas, los cuales varían su formulación y concentración de componentes activos, lo cual, el modo de aspersión que se utiliza para fumigar un cultivo en específico varía de acuerdo a la dosis. La dosificación de un agroquímico presenta ciertos factores a considerar, como lo son la plaga o virus que se desea controlar o eliminar, el clima, el tipo de cultivo, el equipo de bombeo disponible y finalmente el tipo de agroquímico a utilizar, este último, posee una etiqueta en su envase que especifica sus componentes en

relación al volumen del recipiente donde se envasa, y la dosis general recomendada para su uso.⁴¹

5.2.5 Bases para una buena aplicación⁴². En la etapa de fumigación, se debe tener en cuenta algunos factores al momento de realizar la dosificación del plaguicida, ya que esto evitara costos elevados para el agricultor, y mantiene o aumenta la eficiencia del cultivo. Estos factores son:

- **Calidad del agua:** El agua entre más pura permite mantener el equipo de aplicación en buenas condiciones e incide en la efectividad del agroquímico, ya que influye en la reacción de los componentes activos como el pH, dureza (presencia de iones de Ca y Mg), y sólidos disueltos (materia orgánica y arcillas en suspensión).
- **Efectividad:** Dependerá de la concentración de los componentes activos del agroquímico.
- **Momento Oportuno:** El momento adecuado para la aplicación del agroquímico basado en el estado de desarrollo de las plagas (insecto, bacteria, hongo, malezas, etc.).
- **Homogeneidad:** Consiste en el control del riego del producto teniendo en cuenta la cantidad indicada, se efectúa mediante el control de aspersión de la boquilla y su calibración adecuada.

5.2.6 Tipos de Boquilla. Existen dos tipos de boquillas generales, que permiten un modo adecuado de aspersión, así mismo se debe tener en cuenta otros factores que influyen en el riego que genera. En la tabla 2 se mostrará un cuadro de comparación con respecto a las características que influyen el tipo de boquilla.

⁴¹ Bonilla, Álvaro. Cálculo de la Dosificación de un Plaguicida. Intagri (en línea). Enero 30, 2017. Recopilado en: 14 de agosto de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2OV02hQ>).

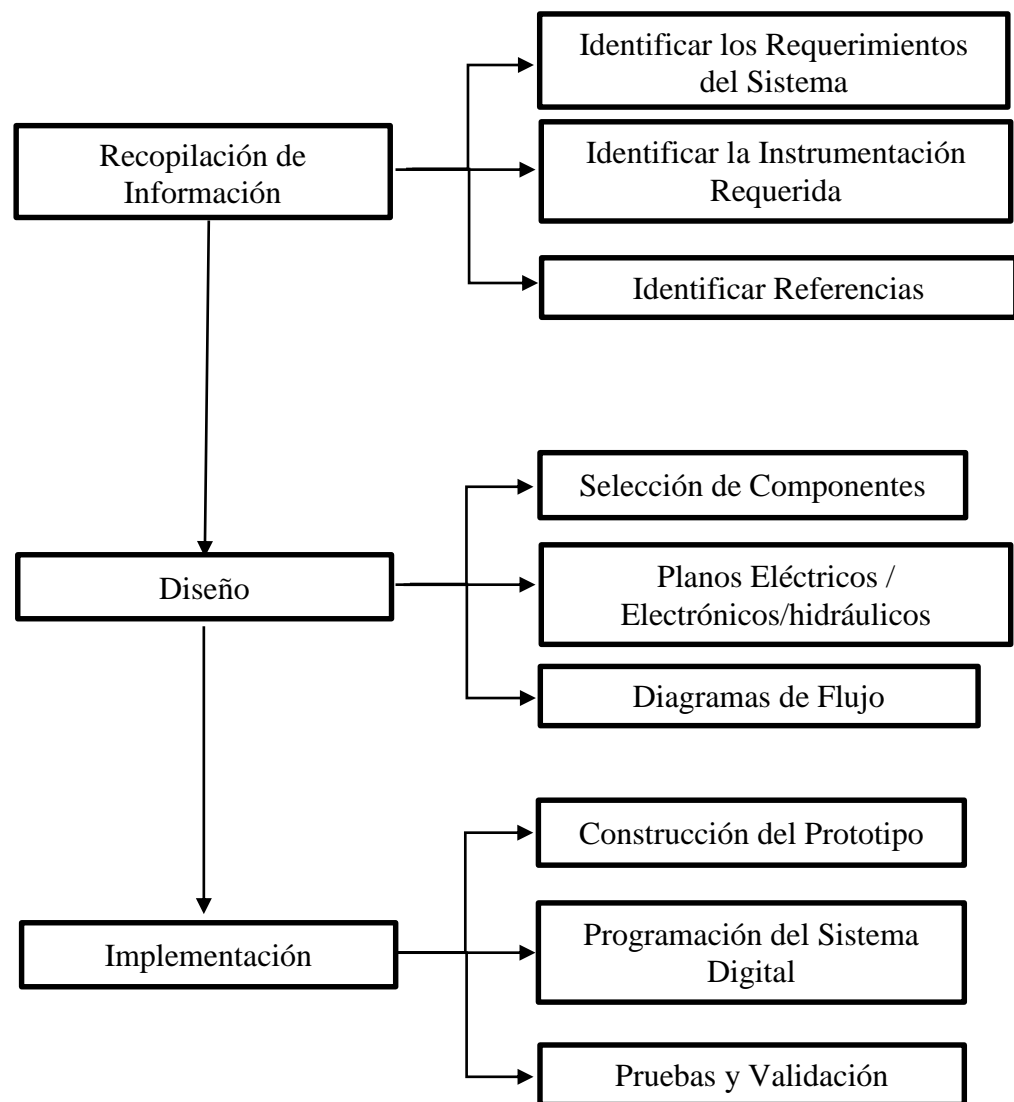
⁴² INTAGRI. 2017. Cálculo de la Dosificación de un Plaguicida. Serie Fitosanidad. Núm. 75. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 4 p. Recopilado en: 14 de agosto de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2OV02hQ>).

Tabla 2: Tipo de boquillas con respectivos factores de uso.

Boquilla Tipo Cónica	Boquilla Tipo Abanico
Trabaja con Alta Presión	Trabaja con Baja Presión
Genera Gotas Pequeñas	Genera Gotas Medianas y Grandes
Optima Cobertura	Cobertura Media
Se utiliza para Insecticidad y Fungicidas	Se utiliza para Herbicidas

Fuente: Inostroza, F.J. 2009. Manual de Papa para la Araucanía: Manejo y Plantación. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 193. Temuco, Chile. 115 p. Recopilado en: 14 de agosto de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2Aw3cx0>).

6 METODOLOGÍA



6.1 RECOPILAR INFORMACIÓN

Esta etapa consistió en recopilar información acerca de los tipos de tecnologías ya existentes con respecto al dispositivo a diseñar. Así mismo, se identificaron los diferentes componentes para la fumigadora,

6.1.1 Identificar los Requerimientos del Sistema. En el diseño e implementación de un dispositivo, se debe tener en cuenta ciertos parámetros que debe cumplir dentro del proceso establecido. Para este caso, la fumigadora debe cumplir con ciertos parámetros, como lo son el caudal requerido para la aspersión

de agroquímico, la presión requerida para la pulverización del líquido en la boquilla, y la autonomía que el dispositivo debe tener ante una jornada de trabajo. Para esta etapa se investigaron a fondo estos factores, de modo que, en el diseño e implementación del dispositivo, cumpla con los objetivos planteados.

6.1.2 Identificar la Instrumentación Requerida. Para el correcto funcionamiento del dispositivo, este requiere de componentes, los cuales, cumplen una función específica ante el proceso a gestionar, en esta etapa, se escogieron los componentes a utilizar en la implementación del dispositivo, de acuerdo al funcionamiento y dimensiones.

6.1.3 Identificar Referencias. En esta etapa, después de escoger los componentes requeridos en la etapa anterior, para cada uno de estos, se investigó 3 referencias por componente, cuyas especificaciones sean acorde al diseño e implementación de la máquina.

6.2 DISEÑO

En el diseño, se realizaron los respectivos planos y diagramas de flujo con respecto a los componentes y sistemas a implementar, y los componentes adecuados para tal fin.

6.2.1 Selección de Componentes. En esta etapa se seleccionaron los componentes como el sensor de flujo, la bomba de presión, estos componentes deben cumplir con el rango de presión adecuado. Se escogió también una máquina fumigadora manual con un tamaño apropiado a los componentes que se van a implementar, de esta, se utilizara el reservorio del agroquímico y la montura como soporte para el reservorio, baterías y el sistema a implementar. Estos se escogieron de acuerdo a las referencias ya consultadas en la etapa interior, teniendo en cuenta sus costos, y que sus características cumplan con lo requerido en el Trabajo de grado.

6.2.2 Planos Eléctricos / Electrónicos. Se realizaron los planos eléctricos con respecto al sistema de alimentación de la fumigadora, y el plano electrónico para la instalación del sistema de control automático de flujo.

6.2.3 Diagrama de Control. El diagrama de control se realizó con respecto al proceso que debe realizar el sistema de control de flujo, y los respectivos componentes que actúan en el control del sistema.

6.3 IMPLEMENTACIÓN

Ya diseñados los acoples y sistemas, se procedió a integrar todos los sistemas en la maquina fumigadora como lo son: la bomba, el almacenamiento y distribución de energía, baterías y control automático de flujo.

6.3.1 Construcción del Prototipo. Con base a los planos eléctricos y electrónicos, se implementó el sistema de bombeo automático en la estructura metálica y el tanque, y se le realizaron unas modificaciones físicas a la estructura para acoplar el sistema de alimentación.

6.3.2 Programación del sistema Digital. Debido a que se realizó un control de flujo, se utilizó un sistema embebido, y se generó la programación del mismo de acuerdo a los caudales requeridos por las boquillas.

6.3.3 Pruebas y Valoración. En esta última etapa se realizaron pruebas del funcionamiento de la máquina para detectar posibles fallas y realizar los últimos ajustes para una puesta a punto, cumpliendo con los objetivos inicialmente planteados.

7 DISEÑO

7.1 SELECCIÓN DE COMPONENTES

En esta etapa, se identificaron los requerimientos necesarios para el diseño e implementación del dispositivo, así mismo, para el caso de la bomba y el sensor, se escogieron tres referencias de estos componentes, cuyas especificaciones sean las más cercanas a las del prototipo. Con respecto a las referencias anteriores, se escogió cada uno de los componentes a utilizar en el dispositivo a implementar, estos componentes son:

7.1.1 Batería. La batería debe proveer un voltaje promedio de 12 voltios y contar con un sistema de recarga con conexión de corriente alterna a 120 voltios. Debe brindar una autonomía al sistema de 8 horas, el tiempo de autonomía se ha determinado por la cantidad de horas laborales diarias que ejerce el agricultor en el campo.

En los anexos se encuentran las referencias de las baterías que se consultaron, teniendo en cuenta, que las características de las mismas se encuentren dentro del rango mínimo de los requisitos del sistema. Se consultaron dos baterías tipo LiPo de 11 a 12 voltios cada una, las cuales, tienen como ventajas que son de menor tamaño y de bajo peso con respecto a las baterías de ácido plomo. Sin embargo las referencias de las baterías de LiPo cuya marca son Zippy y Multistar, fueron las referencias de baterías consultadas con los rangos de corriente más altos que pueden suministrar (para la Zippy 4000 mA y para la Multistar 5200 mA), este valor de corriente que suministran las mismas, no cumple con los requerimientos de corriente en el diseño, dados en la tabla 3, por otro lado, el costo de las baterías LiPo es muy elevado con respecto a las de Acido-Plomo, y sus referencias no son fáciles de conseguir en el mercado. Por el contrario, las baterías de Acido-Plomo, poseen referencias que se consiguen con facilidad en el mercado, así mismo son de bajo costo, y con respecto a la referencia que se utiliza en el proyecto, con le con el valor de corriente de suministro que requiere el prototipo.

Tabla 3: Consumo de Corriente del Prototipo.

Consumo de Corriente (Amperes) por cada componente del Prototipo.	
Bomba	5 Amperios
Puente H	0.1 Amperios
Arduino	0.46 Amperios
Sensor de Flujo	0.1 Amperios
Regulador de Voltaje	0.1 Amperios
Pantalla LCD	0.25 Amperios
Total	6 Amperios

Fuente: Elaboración Propia.

La batería a utilizar, presente en la figura 27, es de tipo ácido – plomo con carga regulada, cuyo fabricante es Panasonic, suministra una carga eléctrica de 12 voltios, con una corriente de 8 amperios, aproximada a los 7.2 amperios/hora, con una autonomía de 8 horas. El dispositivo cuenta con un cargador, de 120 voltios y 60 Hz de entrada, y una salida de carga de 12 voltios y 1.7 amperios, el cual se puede observar en la figura 28.

Figura 27: Batería de Plomo – Acido.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 28: Cargador de la Batería.



Fuente: Elaboración Propia.

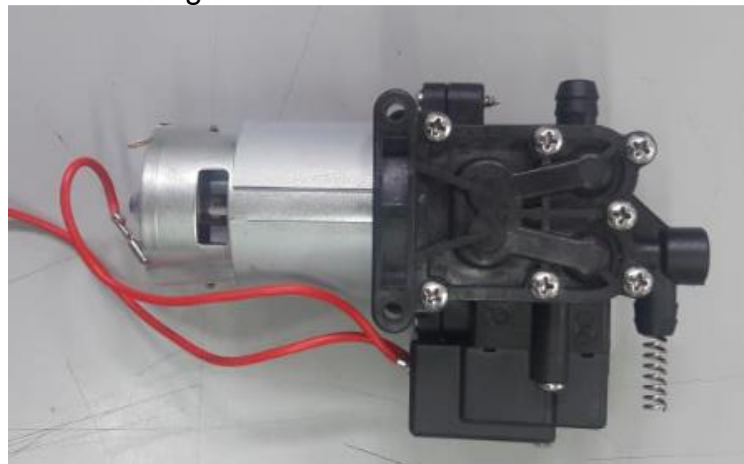
7.1.2 Bomba. La bomba debe cumplir con las especificaciones de presión y de caudal requeridas en la figura 17, la presión debe cumplir rangos desde 40 a 100

PSI debido a que las diferentes boquillas encontradas operan en este rango de presión, y debe suplir un flujo entre los 300 mm/min a 1000 mm/min debido a que es el rango de caudal requerido por las boquillas para dosificar con precisión el plaguicida. Puesto que la fuente de alimentación del sistema es una batería, cuyo voltaje típico es 12 V, el voltaje de operación ideal de la bomba debe ser cercano a este valor.

En la sección de anexos, se encuentran las referencias de bombas consultadas, acorde a los requerimientos para el diseño del prototipo. Se consultaron tres referencias de bombas, las cuales cumplen con el rango máximo de caudal el cual es de 1.2 litros / min, sin embargo, su consumo de corriente o su potencia, esta depende de la presión que genera la bomba en el circuito hidráulico.

La bomba que se escogió para la implementación del prototipo fue la bomba para riego BF, ya que esta cumple con el rango máximo de presión requerido, y su potencia de consumo se encuentra dentro del rango de potencia que suministra la batería. La bomba de dispensador y la bomba de Shui Zhi, no cumplen con los parámetros de presión requeridos, ya que el motor que las compone no posee la potencia suficiente para generar la presión necesaria, lo cual generaría un retraso en la respuesta del sistema de control de flujo si estas se llegasen a implementar. La bomba de diafragma BF, se puede observar en la figura 29, y sus características son, en cuanto al consumo, requiere un voltaje de trabajo de 12 voltios y una corriente de 5 amperios, demandando una potencia de 60 vatios, genera un caudal que puede alcanzar hasta los 4 L / min, la presión máxima que genera es de 100 PSI.

Figura 29: Bomba de Diafragma.



Fuente: Elaboración propia.

7.1.3 Sensor de Flujo. El sensor de flujo debe tener un rango de medición de caudal, que se aproxime entre los 300 mm/min y los 1000 mm/min de acuerdo a los

datos presentados en el marco teórico, sobre los rangos de caudal de las boquillas. Las fumigadoras comerciales ofrecen un rango de variación de flujo de agroquímicos máximo de 1000 ml/min, por lo tanto, este margen sirve como referencia para la selección del sensor de flujo.

En la sección de anexos se presentan las referencias de sensores que fueron consultados, estos tres tipos de sensores se encuentran dentro del rango de medición de caudal requerido para el diseño del control de flujo, sin embargo, se escogió el sensor de flujo G1/4, ya que, los sensores FTB600 y el tipo 8031 presentan un alto costo de adquisición, lo cual, se desvía completamente del presupuesto de implementación del proyecto.

Se escogió el sensor de Flujo que se observa en la figura 30, referente al sensor de flujo G1/4. Este sensor es de tipo turbina, funciona bajo un rango de tensión entre 3 a 18 voltios, y opera entre los 0 a 4.5 voltios, considerando a 0.5 voltios como el flujo bajo y 4.5 voltios como el flujo alto, es la única referencia de sensor de bajo costo disponible en el mercado Colombiano, que mide caudales entre los 0.3 L/min a 1.5 L/min, así mismo, para este sensor se tuvo que realizar los respectivos ajustes, con respecto a los acoples de las mangueras, ya que el calibre de las mangueras de la fumigadora era mayor que el calibre de las entradas del sensor, dichos ajustes se pueden observar en la figura 44.

Figura 30: Sensor de Flujo



Fuente: Elaboración propia.

7.1.4 Fumigadora Manual. La fumigadora manual a utilizar en el proyecto, es la RoyalCondor – Aliada presente en la figura 31, posee un reservorio con capacidad de 18 litros a 20 litros, posee una estructura de plástico y está equipada con cinturones de poliéster para poder ser cargada en la parte posterior del operador.

La máquina viene dotada con tres boquillas, una sencilla y una doble de aspersión cónica, y otra de aspersión de tipo abanico, presentes en las figuras 32 y 33.

Figura 31: Fumigadora Manual.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 32: Boquilla de Aspersión tipo abanico y tipo cónico.



Fuente: Elaboracion Propia.

Figura 33: Boquilla de doble Aspersion tipo cónica.

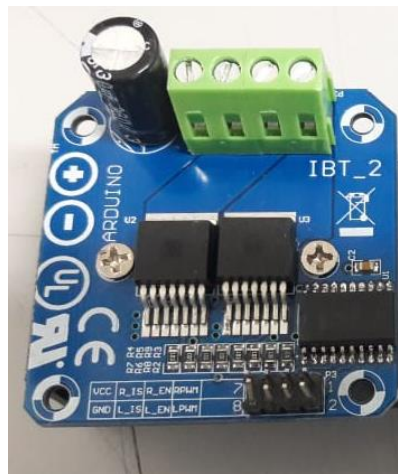


Fuente: Elaboración Propia

7.1.5 Driver Puente H. En la figura 34 se observa un módulo puente H cuya referencia es el BTS 7960, y sus características se encuentra en el anexo 11. Este módulo Puente H utiliza los transistores M.O.S.F.E.T tipo P y N, y un controlador IC (controlador mediante el uso de compuertas lógicas) para el control de potencia de motores, este tipo de driver tiene la característica importante de soportar corrientes elevadas que exigen los motores en el momento de la demanda de torque.

Su voltaje de operación está entre los 10 voltios y 27 voltios, y la corriente máxima de operación es de 43 amperios. Dentro del proyecto también se realizaron pruebas con un módulo M.O.S.F.E.T IRF 520, este módulo se caracteriza por cumplir la función de puente H, con la ventaja de ser de bajo costo, sin embargo, no se logró implementar debido a que la corriente máxima que opera el modulo es de 9 amperios, y el motor de la bomba al momento de arrancar, requiere una corriente de 43 amperios, una magnitud de corriente que no es posible ser controlada por el módulo M.O.S.F.E.T.

Figura 34: Driver BTS 7960 – Puente H.



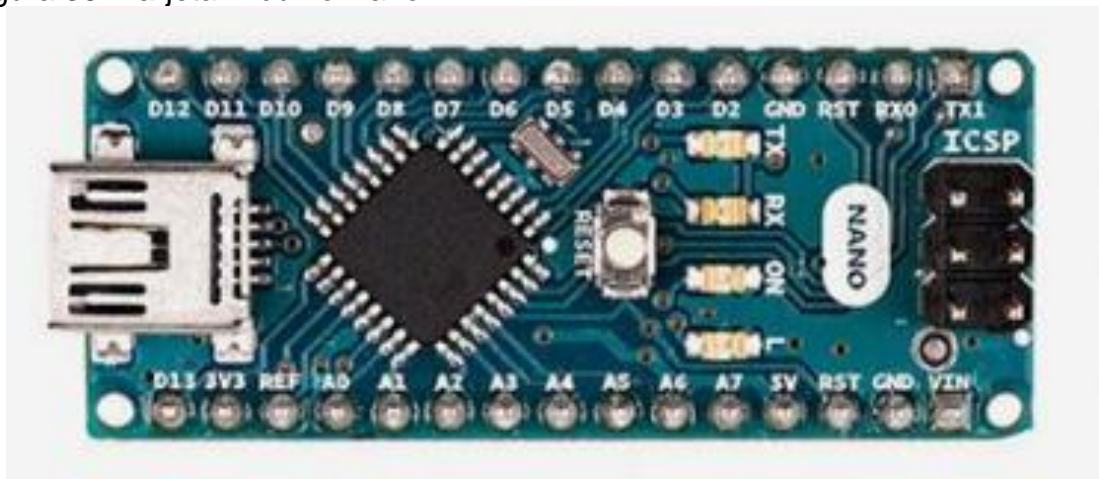
Fuente: Elaboración propia.

7.1.6 Arduino Nano. Se requiere de un elemento que sea capaz de procesar las variables que maneja el sistema, es decir que tome lectura de los sensores y a partir de esto controle la velocidad de la motobomba para dar variación al caudal y además mediante un display le permita al usuario visualizar los datos en tiempo real. El Arduino nano es una plataforma de desarrollo de microcontroladores, basado en el microcontrolador ATmega 328, se compone de una placa, un microprocesador, y una interfaz de entrada y de salida, la cual permite el adapte de elementos periféricos. Se escogió la referencia de este Arduino, principalmente por su tamaño reducido, así mismo, este posee el puerto de salida PWM, requerido para

realizar el control de la velocidad de la bomba, y posee la interfaz de conexión con la pantalla LCD utilizando el protocolo y bus de datos en serie I²C.

Existen otros microcontroladores en el mercado como el PIC y diferentes tarjetas de desarrollo similares al Arduino pero hechas por diferentes fabricantes las cuales pueden tener variaciones en cuanto a procesamiento y sistemas de comunicación entre los más comunes el WiFi. Estos fueron descartados debido a la robustez del proyecto ya que en este caso se está controlando la variable de flujo mediante la variación de PWM y así mismo la visualización de los datos de control se hace mediante un display que está conectado alámbricamente al dispositivo y además por la compatibilidad que existe entre el driver puente H ya que como se observa en la figura 35 su marquilla tiene el símbolo de Arduino lo que expresa una buena relación con esta tarjeta.

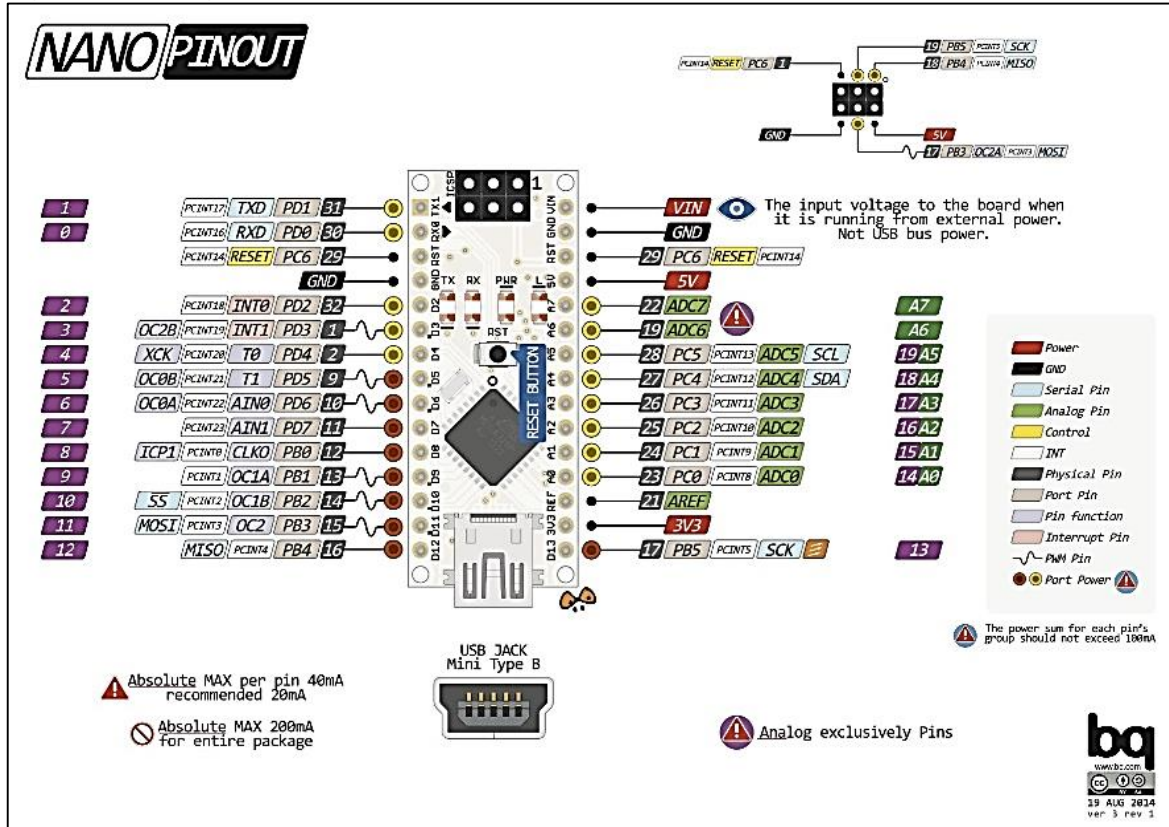
Figura 35: Tarjeta Arduino Nano



Fuente: Google Imágenes. Arduino Nano. Recopilado el: 31 de octubre de 2018
Tomado de: (<https://goo.gl/images/YhtRW4>).

En la figura 36, se tiene el diagrama de pines del Arduino nano, en donde se evidencian la variedad de tipos de pines con los que cuenta el dispositivo. Los pines requeridos para la implementación del controlador son: dos pines con salida PWM los cuales tienen variación de ancho de pulso para el control de la bomba en este caso D5 y D6, dos pines de entrada análoga para la lectura del variador y del sensor de flujo de los cuales son usados A0 y A2 respectivamente y finalmente los pines usados para la comunicación entre el display y el arduino mediante el protocolo I²C; estos son los pines SDA y SCL marcados en el dispositivo como A4 y A5 respectivamente.

Figura 36: Diagrama de pines de Arduino nano



Fuente: Geekfactory, Nano Pinout. Recopilado el: 31 de octubre de 2018 Tomado de: (<https://bit.ly/2BnBiDE>).

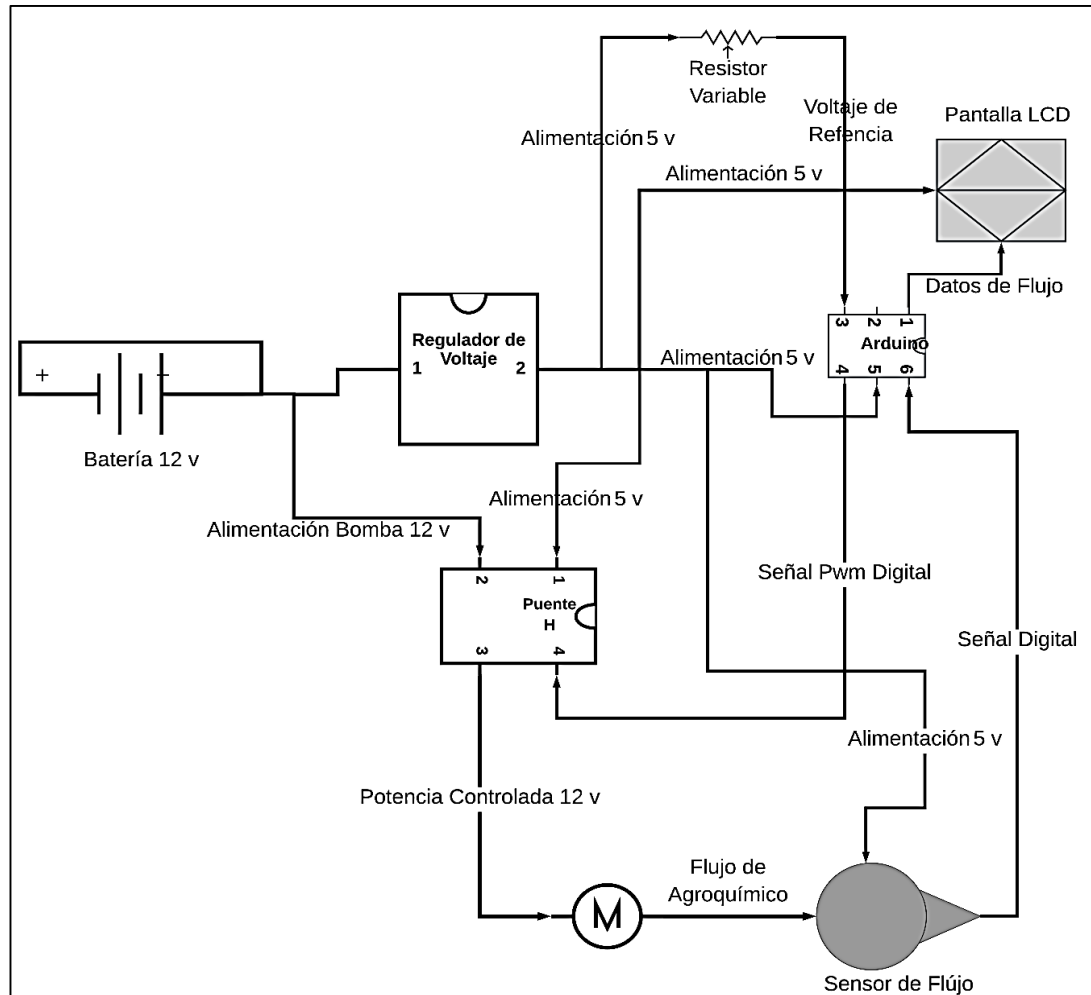
7.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA ELÉCTRICO

En la figura 37, se observa el plano eléctrico del diseño de la fumigadora, los números que se demarcan en los integrados de puente H, Arduino y regulador no hacen referencia a los pines reales. El sistema eléctrico inicia con una batería de 12 voltios, cuya función es de suministrar energía a todo el circuito, esta se encuentra conectada a un regulador de voltaje y al módulo puente H. El puente H, se encarga de controlar el suministro de potencia que brinda la batería hacia la bomba, de acuerdo con la señal PWM que brinda el microcontrolador.

Debido a que los dispositivos presentes en el plano, a excepción de la bomba, funcionan con una tensión constante de 5 voltios, entre estos y la batería se encuentra un regulador de voltaje, cuya función es reducir la tensión de 12 a 5 voltios, la cual se distribuye entre el microcontrolador, el sensor de flujo, la interfaz de usuario, y el puente H. El sensor de flujo, posee tres conexiones, la del voltaje de alimentación que proviene del regulador de voltaje, la de salida de datos hacia el

controlador, y por último la conexión a tierra. Finalmente, la interfaz de usuario se compone de la pantalla LCD, la cual posee una entrada de datos mediante el protocolo I²C por parte del controlador, y una entrada de voltaje que viene del regulador, otro componente que hace parte de la interfaz es el resistor variable, el cual, mediante rangos de voltaje, que ingresan a la entrada del controlador, definirá el rango de caudal de flujo en el que debe operar la bomba.

Figura 37: Diagrama de Bloques Eléctrico del Sistema de Control de Flujo.



Fuente: Elaboración Propia.

7.3 PLANO ESQUEMÁTICO DEL FLUJO

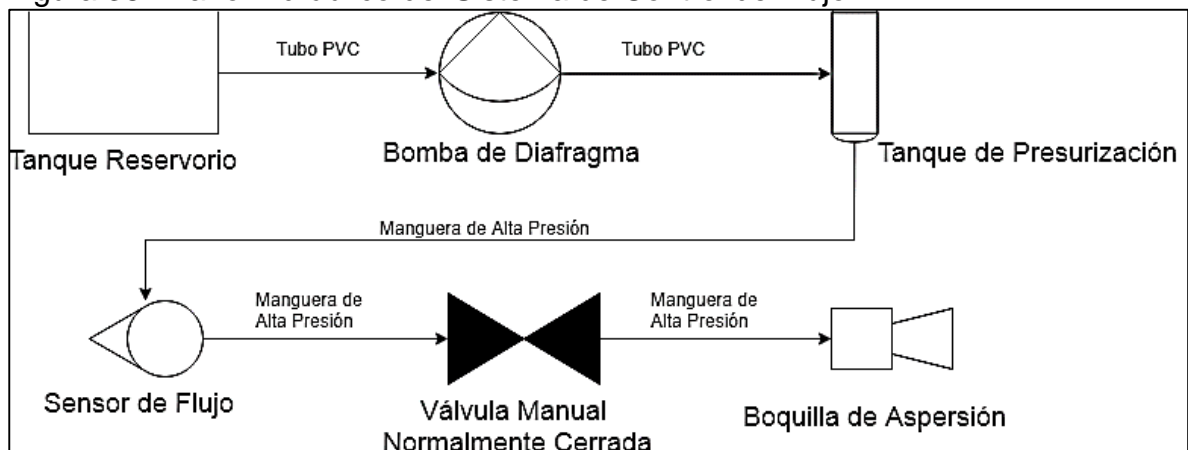
En la figura 38, se observa el plano hidráulico, el cual se compone del tanque reservorio, donde se almacena el agroquímico a dosificar, mediante el acople por tubos PVC, se conecta el tanque reservorio con la bomba, para esta conexión de tiene en cuenta que no requiere del uso de mangueras, ya que para la sección entre

el reservorio y la bomba no se trabaja presiones elevadas, y así mismo, los tubos PVC permiten suministrar el caudal de líquido que demanda la bomba.

Para la conexión de la bomba al tanque presurizado, se utilizó una manguera multipropósito, la cual viene diseñada para soportar hasta 300 Psi de presión, la terminal de tanque de presurizado posee un mecanismo de seguridad, el cual mediante una esfera de acero o balón permite detener el flujo de líquido que se encuentra dentro del tanque de presión a la bomba, evitando en esta el desgaste prematuro de las membranas del diafragma, este mecanismo se activa en el momento en que la bomba no se encuentre funcionando o en pausa.

Desde el tanque de presión se tiene una salida que va hacia la válvula manual mediante una manguera. Entre la salida del tanque y la válvula se encuentra el medidor de caudal, en el momento de accionar la válvula manual, circulara el agroquímico por el sensor de flujo, el cual se encargará de tomar la medida de caudal de plaguicida, para que finalmente sea expulsado por la boquilla de pulverización.

Figura 38: Plano Hidráulico del Sistema de Control de Flujo.



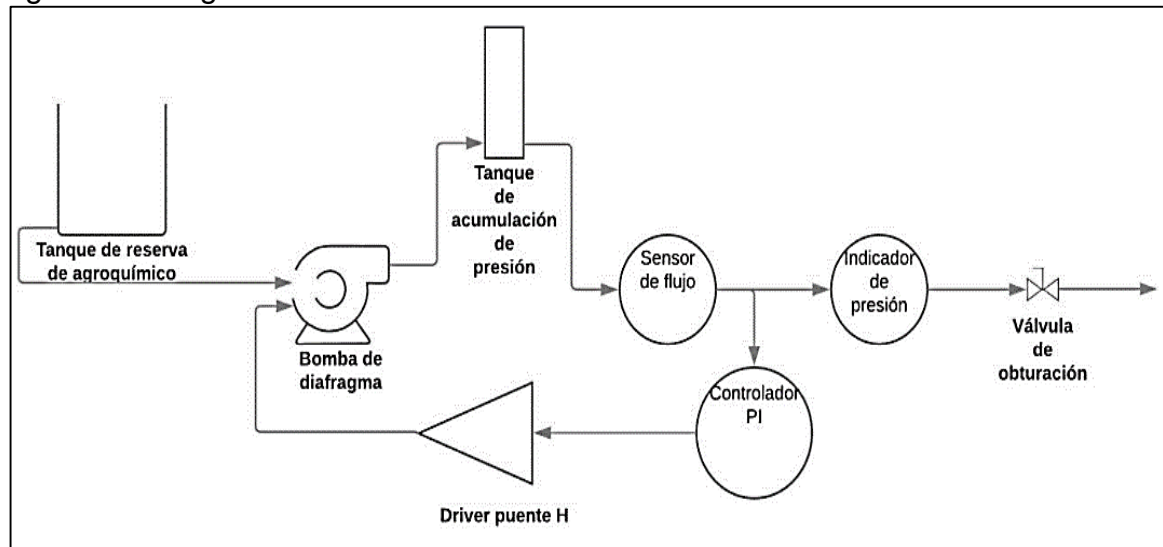
Fuente: Elaboración Propia.

7.4 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL

Uno de los principales objetivos de este proyecto es el diseño e implementación del sistema de control, el que se observa en la figura 39. Ya mencionado anteriormente, el sistema de control permite controlar el flujo necesario en la dosificación del agroquímico, para esto, el tipo de controlador que utiliza es un Proporcional-Integral (PI), que garantice cero errores de estado estable y una respuesta rápida. Para el diseño del sistema de control, el hardware estará compuesto por el puente H, el sensor y el controlador, el funcionamiento del sistema consiste en que, inicialmente al no haber ni presión ni caudal del líquido, el sensor tomara la lectura de 0 mm/min,

por lo que el controlador enviara el PWM al puente H para la puesta en funcionamiento de la bomba, a medida que la medida del caudal se acerca al rango establecido, el controlador disminuye la velocidad de la bomba mediante la señal PWM que envía al puente H, y este disminuye la señal de potencia en la bomba. En la sección de implementación, se amplía en más al detalle sobre el diseño del sistema a de control, como lo es la construcción del prototipo, caracterización de la planta, diseño y programación del controlador.

Figura 39: Diagrama del sistema de Control.



Fuente: Elaboración Propia.

7.5 REQUERIMIENTOS DE LA INTERFAZ DE USUARIO

La interfaz de usuario deberá contar con indicadores de referencia de caudal y de caudal actual, y definir mediante rangos el control de flujo que deberá salir por la boquilla, adaptándolo a las necesidades del operario, la definición del rango de control de flujo se hará mediante perilla. Se escogió este mecanismo de control, debido a que, con respecto al sistema de teclado, la interacción entre operario y el hardware es mucho más práctica con el movimiento de perilla, así mismo, este mecanismo es de fácil implementación, de bajo costo, y al encontrarse dentro de la carcasa de la interfaz, se encuentra protegido de factores externos, como el agua o los agroquímicos.

8 IMPLEMENTACIÓN

8.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

La implementación del dispositivo parte del desmonte de la bomba manual de la fumigadora manual, los componentes que se utilizaron de este equipo es el reservorio, el tanque de presurización, las mangueras, y el conjunto de válvula de aspersión. En la figura 40, se observa la configuración inicial con la que viene ensamblada la máquina, en donde, la bomba se acopla entre el reservorio y el tanque de presurizado.

Figura 40: Acople de Bomba manual al reservorio y al tanque presurizado.



Fuente: Elaboración Propia.

Para la implementación del nuevo dispositivo, un componente importante, viene a ser la estructura de la fumigadora presente en la figura 42, la cual, posee el conjunto de arnés o cinturones, cuyo objetivo es permitir transporte de la máquina. Así mismo, su estructura viene diseñada para soportar la carga del reservorio de la figura 41.

Figura 41: Reservorio del Agroquímico.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 42: Estructura de la Fumigadora (Posición posterior y anterior).



Fuente: Elaboración Propia.

La válvula manual presente en la figura 43, permite controlar el paso del flujo del agroquímico a dosificar, esta cuenta con dos posiciones, abierto y cerrado, lo cual, solo detiene o permite el paso del flujo, posee también un pin, que permite mantener el gatillo en la posición de abierto, y cuenta con un medidor de presión a la vista del operador.

Figura 43: Válvula Manual – Manómetro



Fuente: Elaboración Propia.

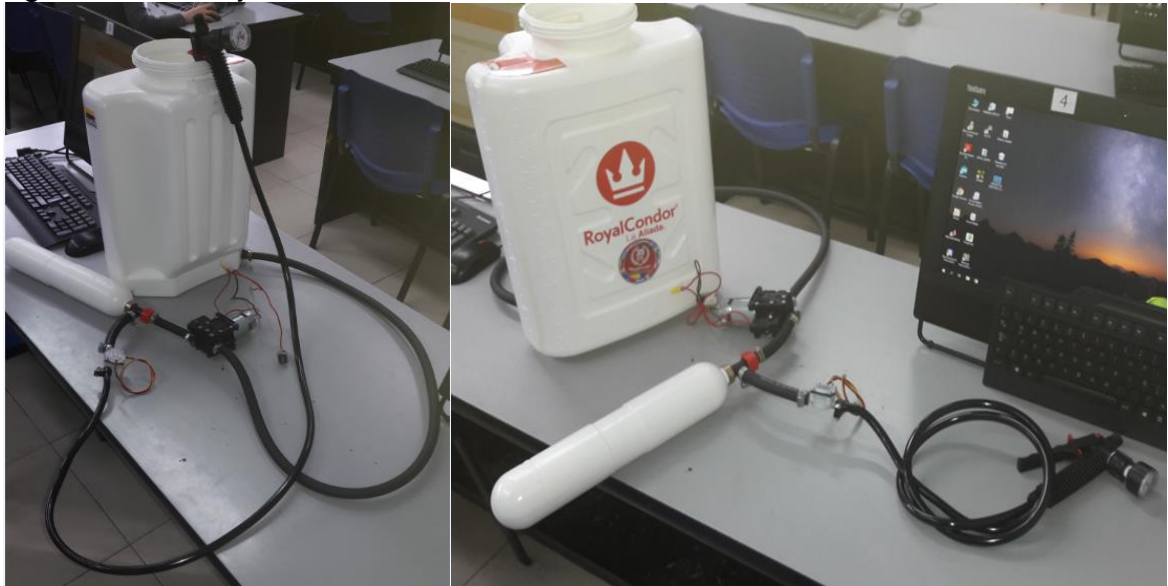
En la figura 44 se observa el sensor de flujo, debido a que el calibre de las entradas del sensor era de $\frac{1}{4}$ ", se procedió a modificarlas mediante mangueras de plástico, de modo que se logró adaptar la entrada y la salida del sensor, a la manguera de $\frac{1}{2}$ ", que utiliza la fumigadora. No se utilizaron conversores de calibre, debido a que no se encontraban en el mercado. En la figura 45, se observa el acople general de los componentes a utilizar, dado el diseño del diagrama de la figura 38, con el fin de realizar las respectivas pruebas y detectar posibles falencias o fugas, con respecto a la carga de presión que se genera en las mangueras.

Figura 44: Adaptador del Sensor a la Manguera.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 45: Montaje de Prueba



Fuente: Elaboración Propia.

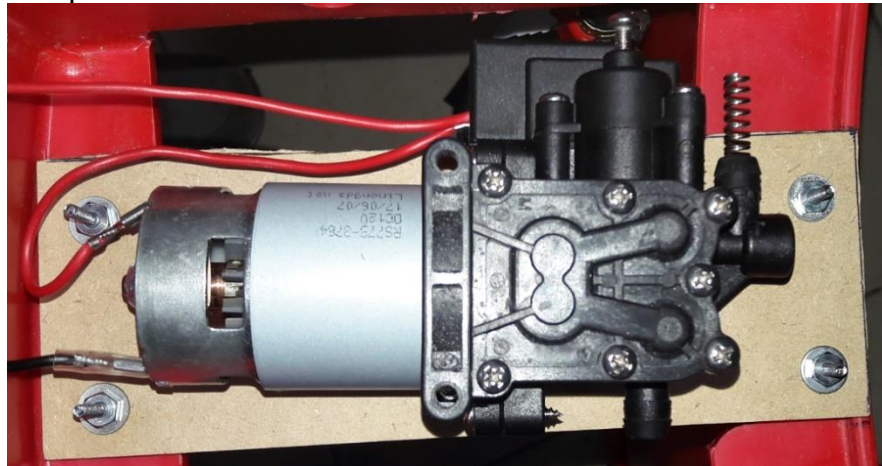
En la figura 46 se observa el conjunto de la valvula, compuesto por la valvula de apertura y cierre, un manometro, la varilla de extension y la boquilla, asi mismo en la figura 47 se observa la instalación de la bomba a la estructura de la maquina mediante el diseño de un a plataforma, y fue ubicada en la parte inferior de la estructura.

Figura 46: Valvula manual.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 47: Acople de la Bomba a la Estructura.



Fuente: Elaboración propia.

Luego de la instalación de la plataforma de la bomba, se precedió a instalar el reservorio del agroquímico en la estructura de la máquina, por medio de tubos PVC se realizó la conexión de flujo del desde el reservorio hasta la bomba, y el encaje

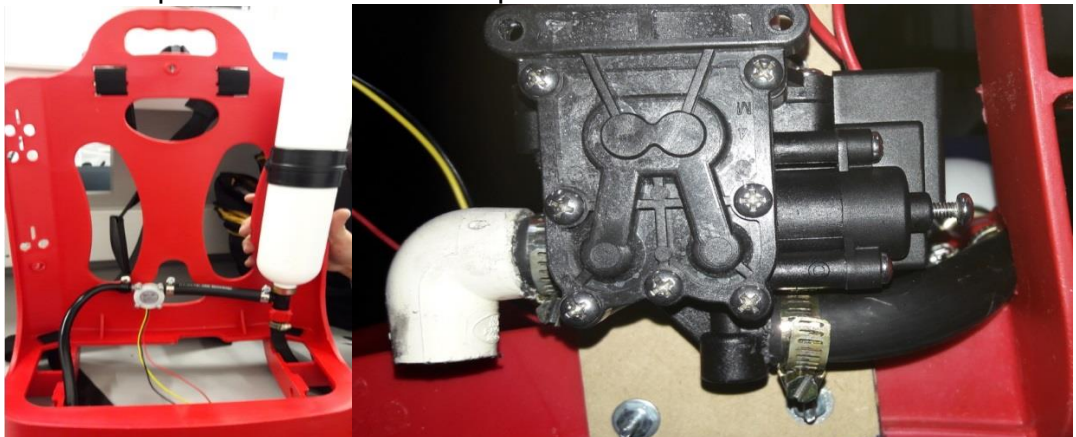
del mismo en la estructura, como se observa en la figura 48, luego, mediante la manguera de caucho que soportan presiones hasta los 100 PSI, se procedió a conectar la bomba con el tanque de almacenamiento de presión, en la misma figura, se observa el soporte del tanque de presión, sujetando al mismo y acoplado a la estructura (ver figura 49).

Figura 48: Acople del Tubo del Reservorio a la Estructura.



Fuente: Elaboración propia.

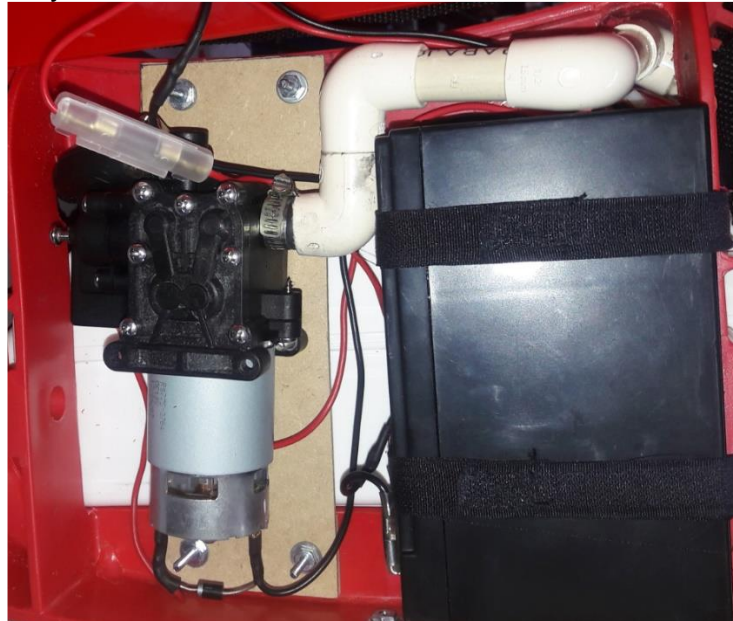
Figura 49: Acople de la Bomba al Tanque de Presión.



Fuente: Elaboración propia.

Para la figura 50, se observa la batería y la bomba, acoplados completamente a la estructura, la batería fue adaptada a la estructura mediante cinta velcro, y la bomba se instalo en la plataforma mediante tuerca y tornillos, en la parte unferir trasera de la maquina, se instalo la terminal de carga de la bateria, y el interruptor se encuentra en unos delos laterales del dispositivo. El sistema de control de la fumigadora lo compone el arduino, el puente H y el regulador de voltaje, estos fueron instalados en una caja de plasticos, y acoplado al costado de la maquina, donde se ubicaba la bomba manual, la caja de ntegrados se observa en la figura 51.

Figura 50: Bomba y batería instalados en la estructura.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 51: Compartimiento de circuitos integrados.



Fuente: Elaboración Propia.

Por último, en las figuras 52 y 53 se tiene el hardware de la interfaz del usuario, la cual está compuesta por una pantalla LCD, y un resistor variable, la pantalla LCD muestra la referencia de flujo, o el flujo mínimo al que debe regular el controlador, y también la cantidad de flujo que provee el sistema, la referencia de flujo puede ser cambiada mediante el resistor variable implementado en el módulo. La pantalla LCD y el resistor variable, fueron conectados a una terminal con referencia RJ-45, con el fin de interconectar el módulo de la interfaz con la máquina. Finalmente, en la figura 54 se observa el modelo de la máquina fumigadora automática terminado.

Figura 52: Interfaz de Usuario



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 53: Terminal de la interfaz de usuario.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 54: Maquina Fumigadora Automática.



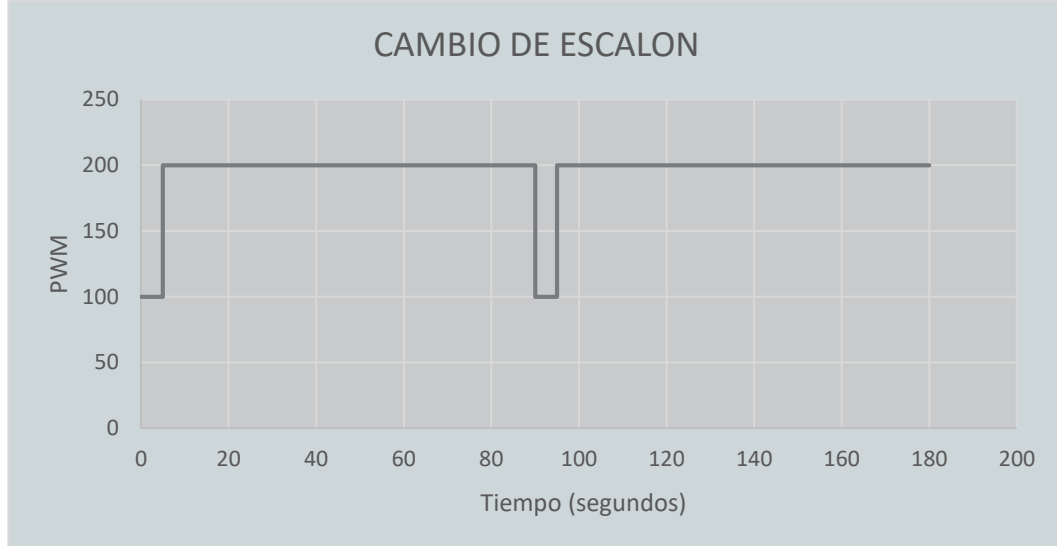
Fuente: Elaboración Propia.

8.2 PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DIGITAL

Para la implementación del control digital se llevaron a cabo una serie de actividades las cuales permitieron identificar la forma de funcionamiento del sistema mediante su curva de reacción y de la cual se podían inferir la ganancia y la constante de tiempo del sistema, con estos datos se modeló la ecuación característica del sistema, que posteriormente fue implementada en el software MATLAB 2016B para simular el comportamiento y mediante el lugar geométrico de las raíces obtener el controlador que afectara al sistema que finalmente fue implementado la programación del controlador.

8.2.1 Caracterización de la Planta. Para caracterizar la planta fue necesario someter el sistema a un cambio de escalón variando el PWM de 100 a 200, teniendo un valor de amplitud de 100. En la Figura 55 se aprecia el cambio que se introdujo en la entrada del sistema, cabe aclarar que el procedimiento se realizó en dos oportunidades para obtener una buena medición de la respuesta que entrega el sistema.

Figura 55: Grafico del Cambio en el Sistema.



Fuente Elaboración Propia.

La curva de respuesta se obtuvo por medio de la gráfica que entrega el puerto serial del software Arduino y es mostrada en la Figura 56, esta respuesta entrega variaciones de caudal al momento de variar el PWM del motor que controla la bomba de la máquina, de esta grafica se infieren datos como la ganancia y la constante de tiempo del sistema además de observar que por su comportamiento el sistema es de primer orden. La ecuación (1) queda de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{3.5}{15s+1} \quad (1)$$

Y se obtiene a partir de la ecuación de un sistema de primer orden:

$$G(s) = \frac{k}{\tau s+1} \quad (2)$$

Donde k es la ganancia del sistema y se obtiene de la siguiente manera:

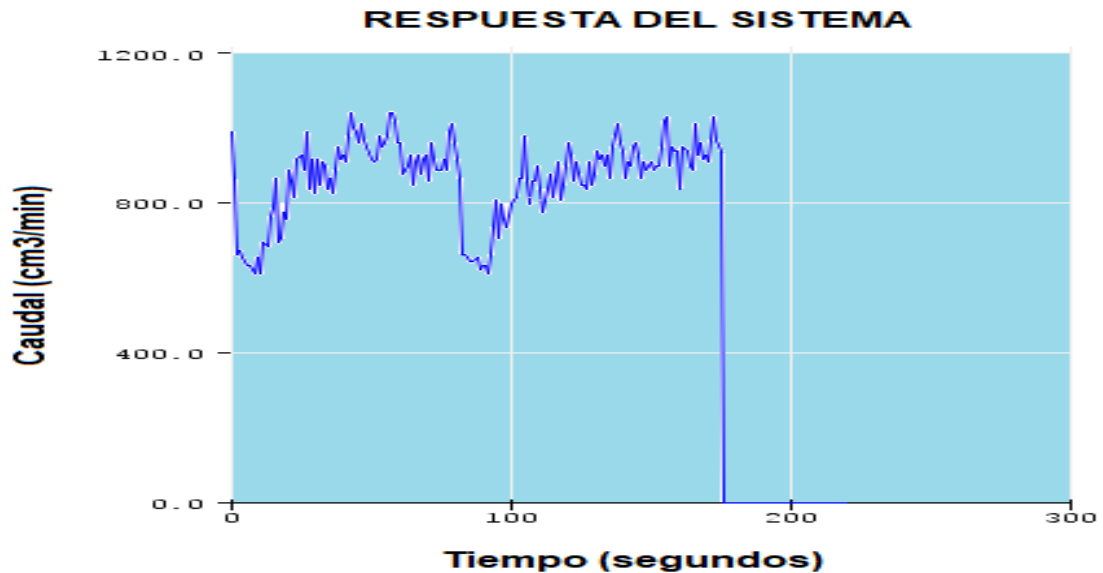
$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{950-600}{200-100} = 3.5 \quad (3)$$

Siendo Δy la diferencia de caudal obtenida y Δx la diferencia del PWM aplicado.

La constante τ es cuando la respuesta obtiene el 63% del valor final y se obtiene dividir el tiempo de asentamiento entre 4 quedando de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{ts}{4} = \frac{60}{4} = 15 \quad (4)$$

Figura 56: Respuesta del sistema PWM.



Fuente: Elaboración Propia.

8.2.2 Diseño del Controlador. Para el diseño del controlador se usó el software MATLAB 2016B el cual mediante sus herramientas permite realizar una simulación de la planta, el código de implementación de este sistema se puede apreciar en la Figura 57, correspondiente a una captura de pantalla de las líneas de código que se introdujeron al software.

Figura 57: Codificación de la Función de Transferencia en MATLAB 2016B

```
>> s=tf('s')  
  
Transfer function:  
s  
  
>> G=3.5/(15*s+1)  
  
Transfer function:  
3.5  
-----  
15 s + 1  
  
>> sisotool(G)
```

Fuente: Elaboración Propia.

Para el diseño del controlador, se utilizó la herramienta Sisotool de MATLAB 2016B, la cual retorna una gráfica en la que se observan parámetros tales como la respuesta al escalón en lazo cerrado, el lugar de las raíces y el diagrama de bode

de la planta, tal como se muestra en la Figura 58. Dependiendo del controlador, esta herramienta permite agregar polos o ceros al sistema, a fin de lograr una respuesta deseada.

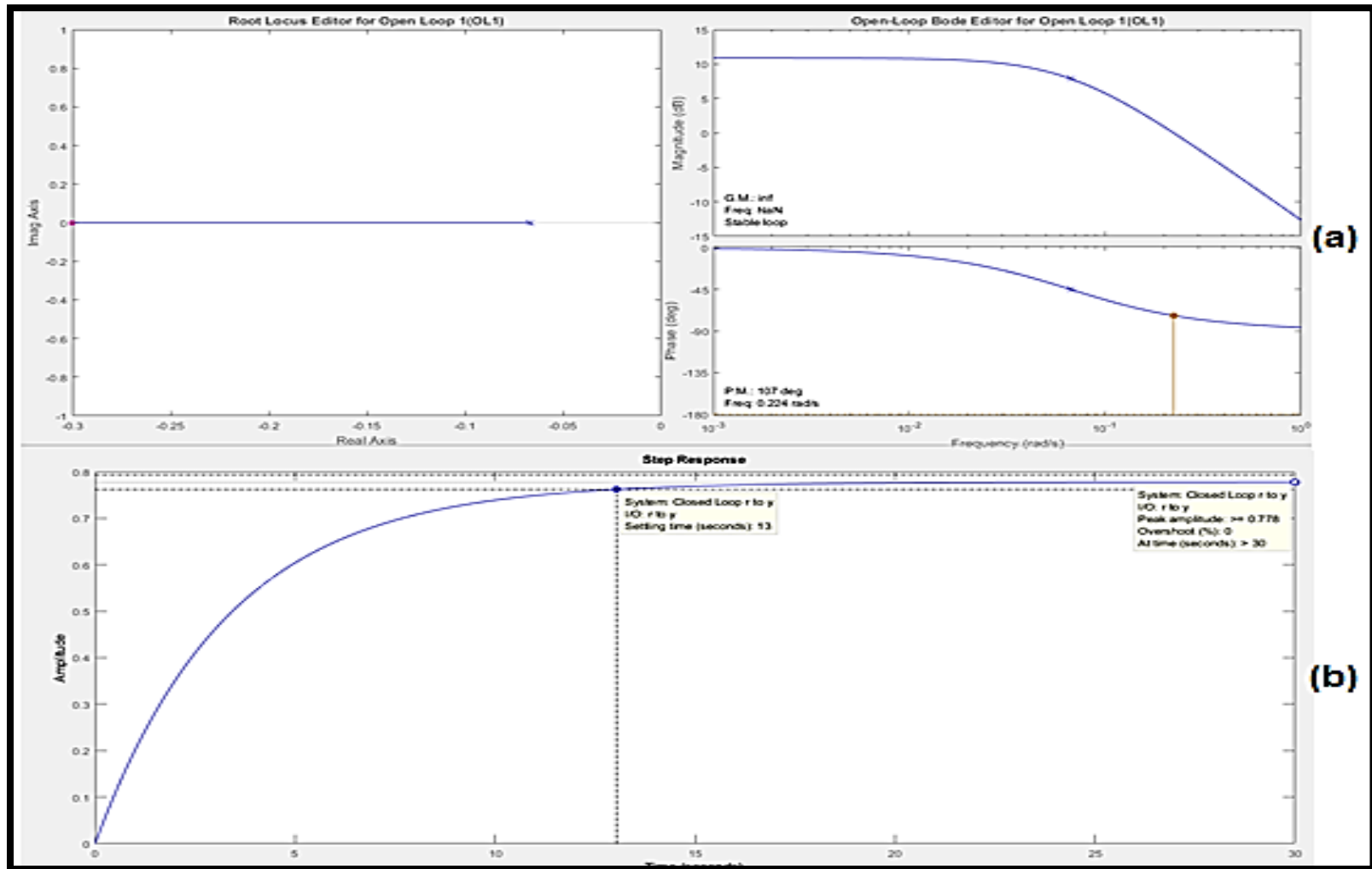
Para el diseño del controlador se tuvieron en cuenta tres opciones: un control proporcional de la forma $C(s) = K_p$, un control integral de la forma $C(s) = \frac{K_i}{s}$ y la combinación de los dos la cual es un control proporcional-integral de la forma $C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$.

Cabe aclarar que el control derivativo no aplica, puesto que se tiene un control de flujo que por su naturaleza es ruidoso, lo cual conllevaría a una amplificación de ruido en el lazo de control.

Para realizar el diseño mediante el software, lo que se hace es modificar el lugar geométrico de las raíces según el caso de control que se quiera aplicar. Para un control proporcional simplemente se modifica la ganancia; para un integral puro se introduce un polo en el origen (integrador) y para un controlador proporcional-integral se introduce un polo y un cero. Finalmente se ajusta la ganancia para lograr una respuesta aceptable.

En el sub-capítulo de “pruebas y validación” se mostrarán los tres tipos de controladores diseñados y sus respectivas respuestas. Es de resaltar que el controlador con mejor desempeño fue el PI, quedando de la forma $C = 1.11 + \frac{0.15}{s}$ presentando un nivel de sobrepaso del 7.5% y un tiempo de asentamiento de 26 segundos.

Figura 58: a) Lugar geométrico de las raíces del sistema b) Respuesta del sistema en lazo cerrado.



Fuente: Elaboración propia.

8.2.3 Programación controlador PI digital. Para el despliegue del algoritmo utilizado en el desarrollo del controlador de flujo, en los anexos se encuentran cada una de las partes que componen el algoritmo, en el mismo, mediante los comentarios se explicó cada una de las líneas en cuanto a la definición o funciones que realizan. En el anexo L se presenta la definición de las Variables del Sistema; en el anexo M se presenta el algoritmo de Interpretación de los datos del sensor de flujo; en el anexo N se presenta el algoritmo para la inicialización y funcionamiento de la pantalla LCD; en el anexo O se presenta el algoritmo de control digital y finalmente, en el anexo P se presenta el algoritmo de control de saturación del actuador e impresión de datos.

Durante el desarrollo del prototipo, la programación del sistema se realizó antes de la implementación, con fin de realizar las pruebas necesarias en la calibración del sensor de flujo, y el comportamiento en el control de la planta, sin embargo, para un óptimo funcionamiento en el control de flujo, se debe reprogramar el sistema al terminar la construcción del prototipo, ya que las longitudes de las mangueras que se tenían en las pruebas no son las mismas con respecto a las del prototipo terminado, lo que puede generar retardos o errores en la respuesta del control de flujo, si no se reprograma el sistema.

8.3 PRUEBAS Y VALIDACIÓN

En este segmento se describirán las diferentes pruebas que se realizaron a la máquina permitiendo realizar diferentes modificaciones en cuanto al controlador para luego llevarla a puesta a punto que permitió mejoras significativas de la misma ya que a partir de estos resultados se hicieron modificaciones al código que iba a controlar el sistema de riego.

8.3.1 Lectura del sensor. Inicialmente se procedió a corroborar que la lectura del sensor fuera exacta para así obtener un dato de flujo correcto que fuera apropiado para el desarrollo del sistema, para ello se implementó un código en Arduino que es mostrado en las Figuras 59 y 60 el cual tomaba lectura del sensor y mostraba en la ventana del puerto serial del software el volumen total de líquido que había circulado por el sistema. Para la lectura del sensor se usó la fórmula que indicaba el datasheet del sensor y se verificó mediante una probeta que el volumen de líquido que se

alojaba en esta fuera igual al volumen de líquido estimado a partir de las mediciones de flujo del sensor y el tiempo.

La ecuación (5) usada fue la siguiente:

$$F = (98 \times Q) \quad (5)$$

- Q es el caudal en L / MIN
- F es la frecuencia de los pulsos en Hz.

Figura 59: Algoritmo para puesta en prueba del sensor (parte 1).

```
volatile int NumPulsos; //variable para la cantidad de pulsos recibidos
int PinSensor = 2;      //Sensor conectado en el pin 2
float factor_conversion=98; //para convertir de frecuencia a caudal
float volumen=0;
long dt=0; //variación de tiempo por cada bucle
long t0=0; //millis() del bucle anterior

//---Función que se ejecuta en interrupción-----
void ContarPulsos ()
{
    NumPulsos++; //incrementamos la variable de pulsos
}

//---Función para obtener frecuencia de los pulsos-----
int ObtenerFrecuencia()
{
    int frecuencia;
    NumPulsos = 0; //Ponemos a 0 el número de pulsos
    interrupts(); //Habilitamos las interrupciones
    delay(1000); //muestra de 1 segundo
    noInterrupts(); //Deshabilitamos las interrupciones
    frecuencia=NumPulsos; //Hz(pulsos por segundo)
    return frecuencia;
}
```

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 60: Algoritmo para puesta en prueba del sensor (parte 2).

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(PinSensor, INPUT);
  attachInterrupt(0, ContarPulsos, RISING); // (Interrupción 0 (Pin2), función, Flanco de subida)
  t0=millis();
}

void loop ()
{
  float frecuencia=ObtenerFrecuencia(); //obtenemos la frecuencia de los pulsos en Hz
  float caudal_L_m=frecuencia/factor_conversion; //calculamos el caudal en L/m
  dt=millis()-t0; //calculamos la variación de tiempo
  t0=millis();
  volumen=volumen+(caudal_L_m/60)*(dt/1000); // volumen(L)=caudal(L/s)*tiempo(s)

  //-----Enviamos por el puerto serie-----
  Serial.print ("Caudal: ");
  Serial.print (caudal_L_m,3);
  Serial.print ("L/min\tVolumen: ");
  Serial.print (volumen,3);
  Serial.println (" L");
}
```

Fuente: Elaboración Propia.

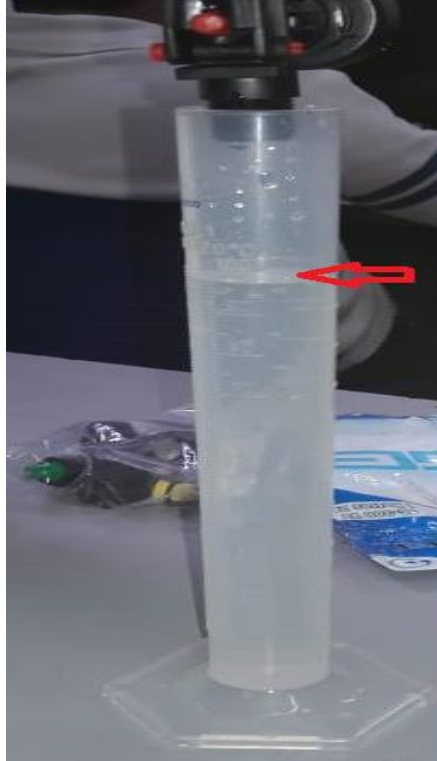
Ejecutando este código se procedió a visualizar el resultado de este en el puerto serial como se aprecia en la Figura 61, siguiente a ello se comprobó por medio de la probeta que el volumen acumulado del programa fuera igual al acumulado en la probeta que para el caso fueron de 100mL como se muestra en la Figura 62.

Figura 61: Visualización de volumen mediante puerto serial.

Caudal: 0.020L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L
Caudal: 0.000L/min	Volumen: 0.103 L

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 62: Volumen de líquido contenido en la probeta.

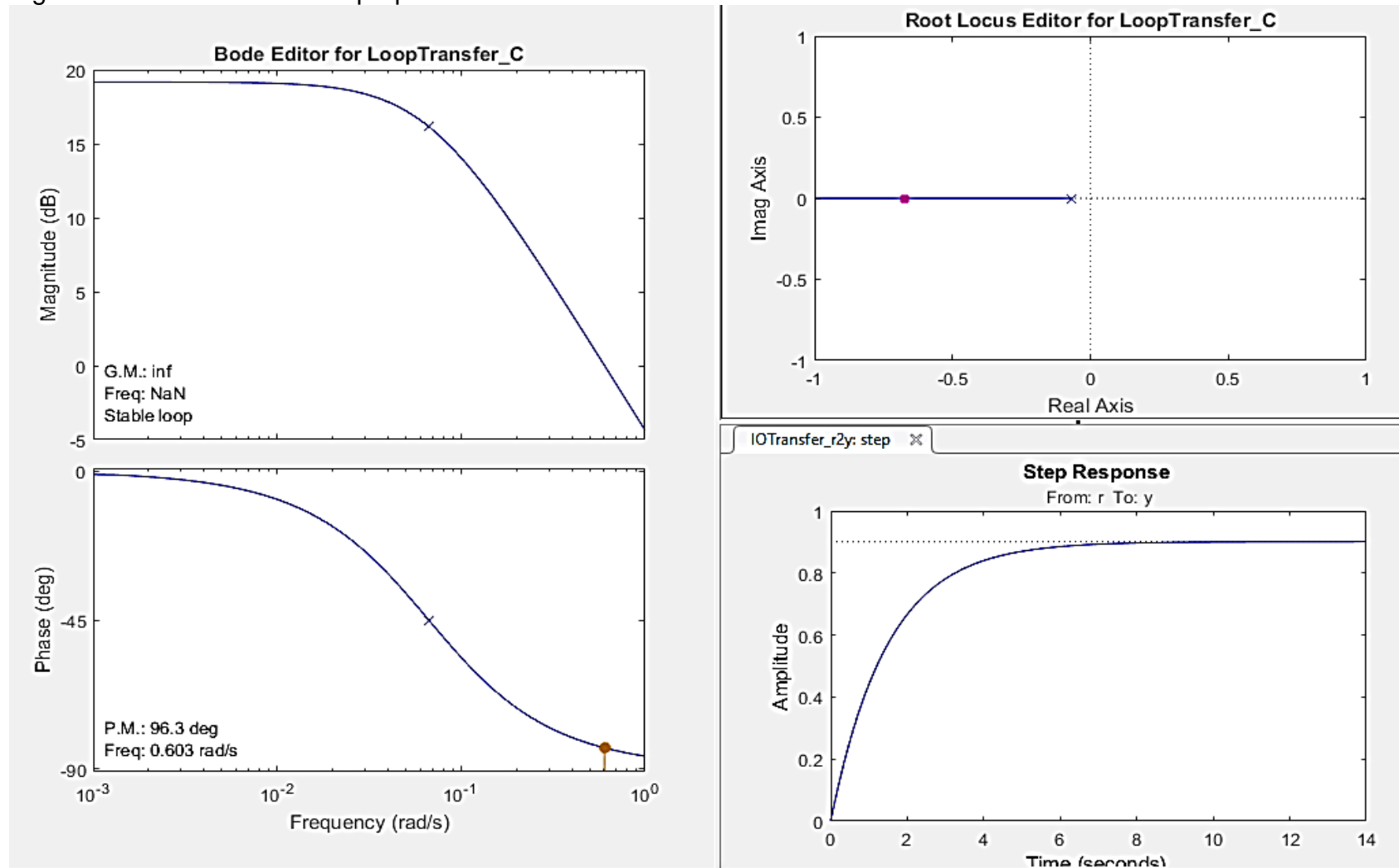


Fuente: Elaboración Propia.

8.3.2 Diferencia entre controladores. En este caso se diseñaron tres tipos de controladores como se describió en el apartado 9.2.2 “Diseño del controlador” en donde finalmente se escogió el que presentó la mejor de las respuestas ante un escalón siendo el caso del controlador PI.

8.3.2.1 Control proporcional. Inicialmente se diseñó un control proporcional con $C=2.6$ mostrado en la Figura 63 con un tiempo de asentamiento de 5.81 segundos pero que finalmente tenía un error de estado estable del 10% lo que no era óptimo para el proyecto debido a que no cumplía con la referencia.

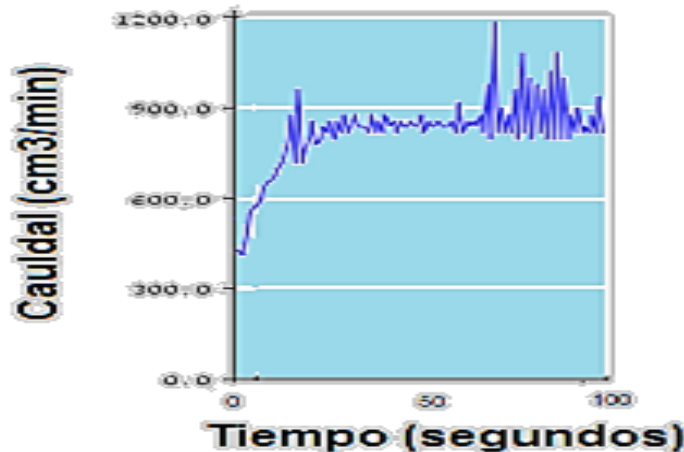
Figura 63: Diseño del control proporcional.



Fuente: Elaboración Propia.

La respuesta del sistema real es mostrada en la Figura 64, en donde la referencia que se debe seguir es de 910 cc/min pero como se aprecia, la respuesta se estabiliza aproximadamente en un tiempo de 20 s y en un valor de 820 cc/min.

Figura 64: Respuesta del sistema al controlador proporcional.

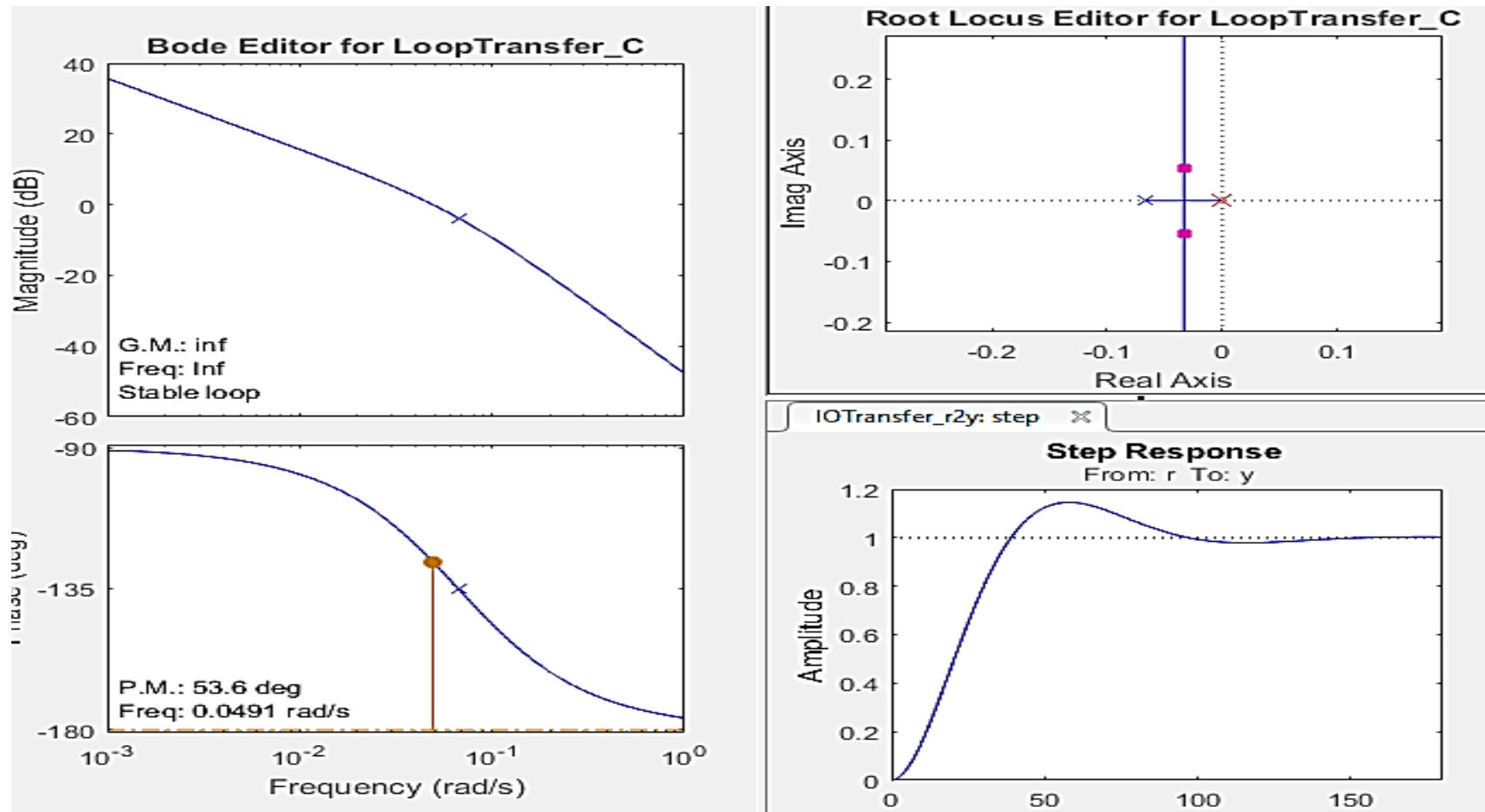


Fuente: Elaboración Propia.

Es de resaltar que un control proporcional reduce el error en estado estable, pero produce cambios muy bruscos en el sistema lo que hace que se genere demasiado ruido y además pueda traer consecuencias negativas en el funcionamiento de la bomba al realizar grandes cambios al valor de PWM que hace que esta entre en funcionamiento.

8.3.2.2 Control Integral Puro. Posteriormente se diseñó un controlador integral puro para observar el comportamiento que tenía el sistema cuando se gobernaba por este tipo de control. El controlador fue de la forma $C = \frac{0.017}{s}$ en donde se obtuvo un sobrepaso de 14.6% y un tiempo de asentamiento de 121 segundos. Este controlador sí elimina el error de estado estable, pero vuelve muy lento al sistema por lo que el operario debería esperar demasiado tiempo a que el flujo se estabilizara. El diseño en el software es mostrado en la Figura 65.

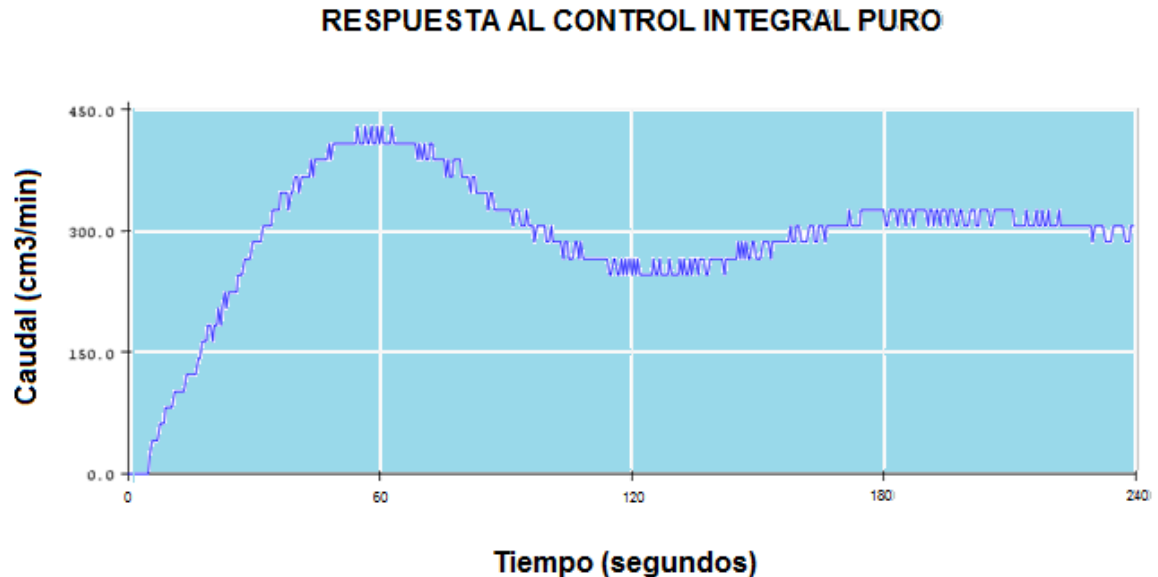
Figura 65: Diseño del controlador integral puro.



Fuente: Elaboración Propia.

Siguiendo una referencia de 300 cc/min el sistema real con el controlador integral puro tuvo la respuesta mostrada en la Figura 66 en donde se aprecia que el ruido que sigue presente disminuye significativamente con respecto al control proporcional, además que en este caso el sistema si es capaz de alcanzar la referencia pero tarda demasiado tiempo como se había mencionado anteriormente.

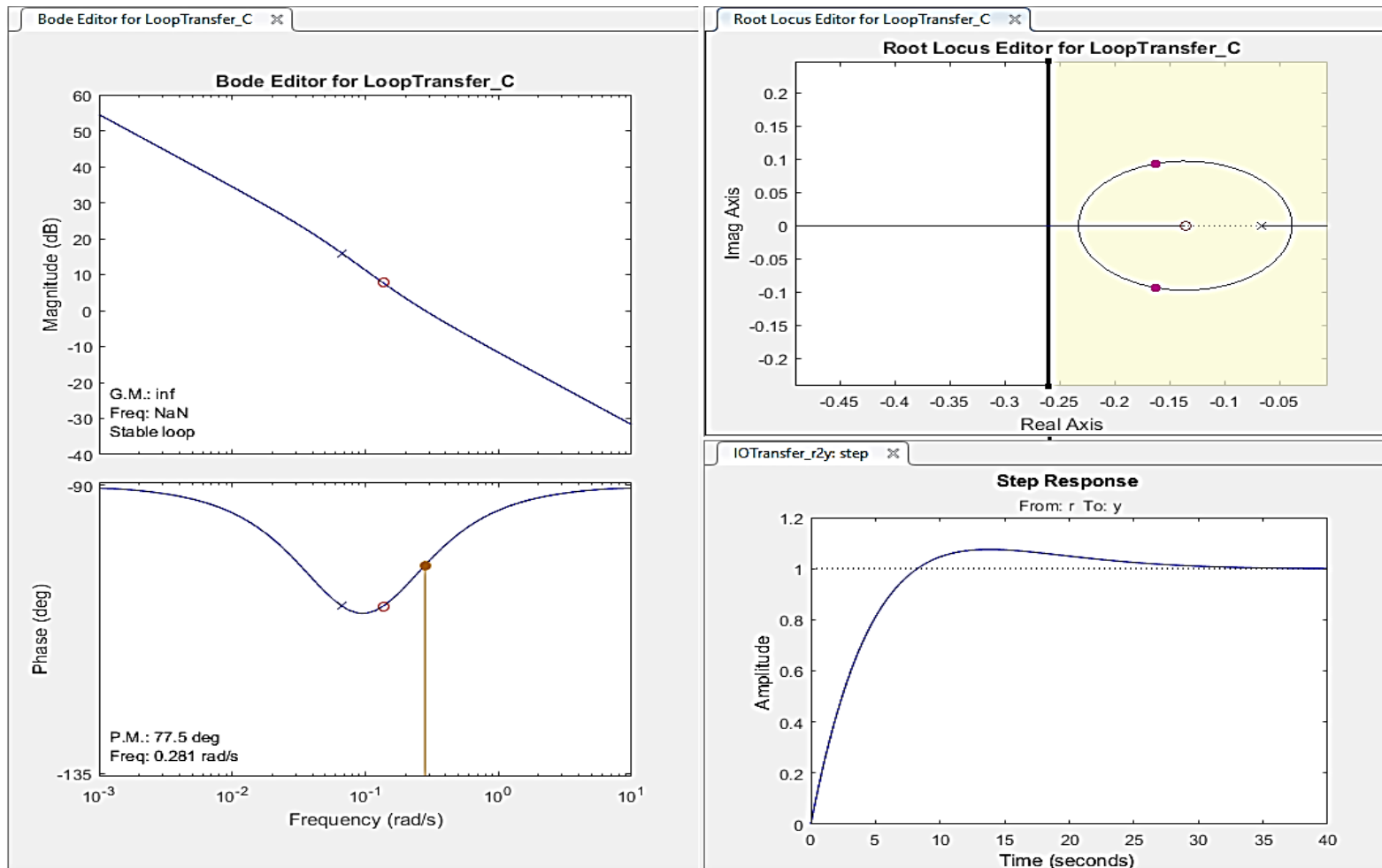
Figura 66: Respuesta del sistema al control integral puro.



Fuente: Elaboración Propia.

8.3.2.3 Control Proporcional Integral (PI). Como los controladores anteriores no respondieron de la forma adecuada se procedió a diseñar un controlador proporcional-integral con el fin de que se complementaran para reducir el error de estado estable, el tiempo de asentamiento y el sobrepaso máximo. El controlador es: $C = 1.11 + \frac{0.15}{s}$ y este es apreciado en la Figura 67 donde se observa el lugar geométrico de las raíces, la respuesta en frecuencia y la respuesta al escalón, teniendo como características un sobrepaso del 7.5% y un tiempo de asentamiento de 26 segundos y que en definitiva fue el control que uso la máquina.

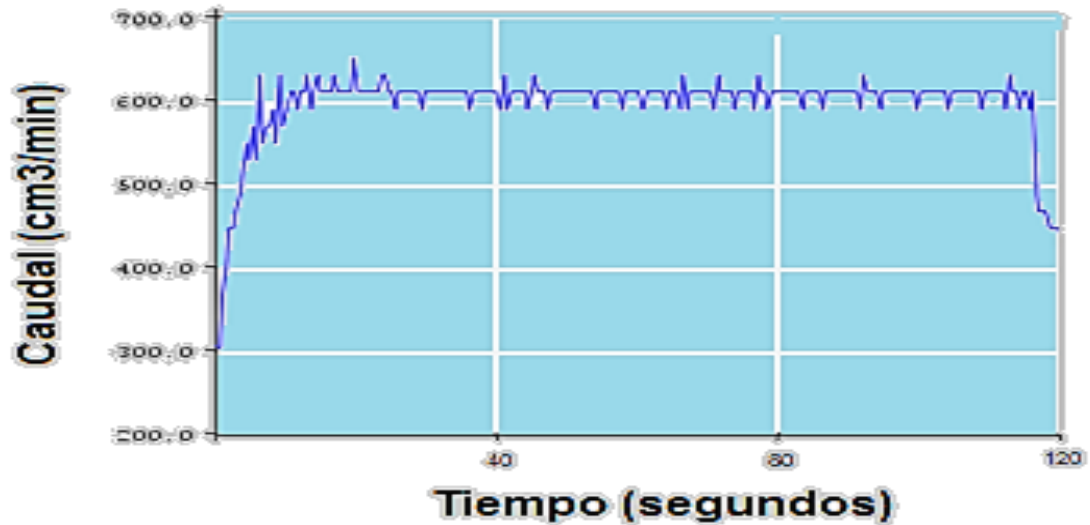
Figura 67: Diseño del controlador PI.



Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, el sistema se sometió a un cambio de referencia desde 300 cc/min a 610 cc/min y se obtuvo la respuesta que se muestra en la Figura 68 en donde se aprecia que sigue una respuesta similar a la de la Figura 67. También hay que aclarar que el ruido sigue distorsionando la señal, pero en este caso es mucho menor que el anterior.

Figura 68: Respuesta del sistema al controlador PI.



Fuente: Elaboración Propia.

9 PRUEBAS DE CAMPO

Las pruebas del prototipo fueron realizadas en una finca ubicada en la vereda El Volador del municipio de Cáqueza, ubicado al oriente de Cundinamarca. Dentro del reconocimiento del terreno se observó un cultivo de tomate de invernadero en estado de maduración (figura 69).

Figura 69: Imagen satelital del sitio de prueba



Fuente: Elaboración Propia.

En primera instancia se procedieron a identificar los agroquímicos que se iban a usar para la fumigación del cultivo. La Tabla 4 muestra el tipo y la cantidad a usar por carga de la máquina. Es de aclarar que estos agroquímicos son compatibles y se pueden usar al tiempo para evitar repetir el proceso de fumigación (véase figura 70).

Tabla 4: Agroquímicos aplicados a la fumigación.

NOMBRE	TIPO	VOLUMEN (CC)
Alisin	Insecticida	30
Daconil	Fungicida	20
Fertiamino	Fertilizante	50

Fuente: Elaboracion Propia.

Figura 70: Agroquímicos utilizados.



Fuente: Elaboracion Propia.

Después de tener los valores a utilizar se procede a mezclar los agroquímicos con agua según los parámetros ya descritos, para ello se utiliza un balde con agua y se aplican las cantidades necesarias mediante una copa que permite medir el volumen de líquido a usar como es mostrado en la Figura 71 & figura 72, se realiza la mezcla, luego se vierte al reservorio de la máquina y finalmente se completa la carga con agua.

Figura 71: Mezcla de agroquímicos.



Fuente: Elaboracion Propia.

Figura 72: Carga de la mezcla al tanque de la máquina.



Fuente: Elaboracion Propia.

Después de tener la maquina ya cargada se da inicio a la fumigación de la planta de tomate; una de ellas es mostrada en la Figura 73, donde se puede apreciar que sus frutos se encuentran en una etapa de maduración. En la Figura 74 se muestra una visión general de la maquina en el campo de aplicación y para la Figura 75 se tiene la aspersión del agroquímico a la planta. Para este caso se debe hacer de forma que cubra toda la planta desde la raíz hasta la parte más alta.

Figura 73: Planta de tomate.



Fuente: Elaboracion Propia.

Figura 74: Prueba en cultivo de tomates.



Fuente: Elaboracion Propia.

Figura 75: Aspersión del agroquímico hacia la planta.



Fuente: Elaboración Propia.

Como resultados de la prueba se obtuvo que con una referencia de 500 cc/min, el tiempo que tardó el tanque en liberar 20 litros de agroquímico fue de aproximadamente de 40 minutos, lo cual confirma la exactitud en el flujo de salida.

Así mismo los 20 litros de agroquímico con que se cargó la maquina fueron suficientes para fumigar un promedio de 500 matas por lo que en otras palabras a cada mata se le destino un tiempo de 8 segundos de 40 cc/minuto en promedio. El procedimiento se repitió en 4 ocasiones con una sola carga de baterías ya que el cultivo contaba con 2000 matas de tomate y con una duración de 2.6 horas de trabajo, según los cálculos de autonomía se estima que con una sola carga de baterías se alcanzarían a realizar 9 cargas y descargas del tanque de reserva del agroquímico para un total de 4500 matas de tomate.

10 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el desarrollo del sistema se presentó un inconveniente en donde el módulo puente H se quemaba en varias ocasiones después de realizar pruebas y desconectar el sistema de la alimentación, inicialmente se pensaba que era por sobrepicos de corriente al momento de arrancar el motor o cuando este se sometía a variaciones fuertes de PWM, luego de descartar mediante mediciones de corriente, con el uso de terminales fijas para las conexiones, con el reemplazo del dispositivo que nuevamente falló y gracias a las recomendaciones del director se llegó a la conclusión de que por ser un circuito inductivo, al momento de desconectar la alimentación se producían sobrepicos de tensión que se introducían desde el motor hacia el modulo lo que hacía que este se quemara. La solución a esta dificultad fue conectar un diodo en inverso y paralelo al motor de tal manera que, durante los ciclos de apagado, la corriente en el motor tenga un camino de conducción alterno sin presentar cambios bruscos.

En la modificación de la tubería se debió tener presente que los acoples entre tubería de PVC y la manguera de caucho-lona no existiera ningún tipo de fugas ya que esto podría generar consecuencias negativas al sistema pudiendo generar daños en el funcionamiento de la bomba o las baterías, que son los elementos que quedarían expuestos en caso de fugas de agroquímico.

Debido a que los autores no tienen conocimiento en el área de materiales para diseñar una mejor estructura en la base de la máquina, se implementó una tapa en acrílico para cubrir los elementos y la tubería, esta tapa no se adapta un 100% a la forma de la maquina por lo que podría tener algunos inconvenientes futuros ya que los elementos protectores de los componentes eléctricos no son herméticos pero de forma futura se podrían corregir modificando la forma estructural de la base de la máquina, y usando materiales termoformables.

Para la interfaz de usuario, surgen dudas sobre su ubicación ya que habría que entrar en detalles de ergonomía para buscar el mejor sitio donde no incomode al operario. Por el momento se decidió ubicarla en la correa de carga izquierda debido a que es un sitio en donde se pueden tomar lecturas constantemente y además no causa interferencias en el libre movimiento del operario.

Hay que tener en cuenta que los ciclos de carga pueden variar según el cultivo o el agroquímico a utilizar ya que según el caso pueden tener diferentes requerimientos de aplicación lo que influye en la variación del flujo y la potencia demandada, lo cual puede reducir o ampliar los tiempos de autonomía del sistema.

11 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Incorporar el sistema de control de flujo en sistemas de fumigación masiva, mediante el uso de otros tipos de sensores como el de presión, o sensores que permitan tomar datos de aspersión desde la boquilla de pulverización, brindándoles, una mejor dosificación de plaguicida en el menor gasto de energía y desperdicio del remedio.

Mejorar el diseño de la máquina, de modo que reduzca peso de la misma, minimizando el uso de la estructura por un reservorio al que se le puedan adaptar estos componentes, ahorrando espacios vacíos en la misma, y por lo tanto, reduciendo su tamaño, y protegiendo los componentes de la humedad.

La interfaz del usuario del presente proyecto se le implemento un resistor variable, que permite mediante la variación del voltaje, indicar el límite máximo de flujo que el sistema debe controlar, sin embargo, como mejora a futuro, se podría implementar un teclado digital, que permita facilitar el ingreso del dato de flujo con mayor exactitud y agilidad.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una máquina fumigadora de espalda con sistema de alimentación eléctrico y control electrónico de flujo, que permite mejorar la dosificación del agroquímico mediante la variación de rangos de caudal, y el control del motor se realizó mediante la modulación por ancho de pulsos, permitiendo que este varíe las revoluciones por minuto en proporción con la demanda del sistema, aumentando la autonomía del sistema.

En la recopilación de información se encontró que existen máquinas fumigadoras eléctricas, con un funcionamiento muy básico, partiendo desde el momento que son puestas en funcionamiento mediante un único interruptor, la bomba del plaguicida comienza a funcionar, a una RPM estándar, aun cuando el sistema no requiera demanda de caudal de flujo, lo cual genera un consumo de energía innecesario, y al momento en que la válvula de flujo sea activada, la presión de plaguicida retenida en las mangueras genera un exceso de aspersión, teniendo como consecuencia, una pulverización extrema del agroquímico, en donde un porcentaje de las gotas expulsadas, no aterrizarán en la superficie requerida, sino que debido a su densidad, se mantendrán en el aire, generando contaminación ambiental.

Se adaptó el sistema de bomba de presurización a una máquina fumigadora manual, y se dotó el sistema con una batería que suministra la corriente necesaria por el controlador, para generar una autonomía de 8 horas, suficiente para cumplir con las horas laborales a la que un operario de agricultura realiza. Además, se encontró que el controlador PI fue el que mejor se adaptó a los requerimientos del sistema ya que redujo el sobrepaso máximo y el tiempo de asentamiento y así mismo hizo que el sistema si alcanzara la referencia ajustada eliminando el error en estado estable, aunque por ser un control de flujo si se encontraron algunas variaciones debido al ruido que este presenta.

Mediante prueba en campo se evidenció que el sistema de fumigación permite llevar a cabo la dosificación regulada de agroquímico, con una autonomía suficiente para labores de fumigación diaria.

En la integración de todo el sistema, una de las partes más importantes fue el software, debido a que la programación del controlador debía tener en cuenta aspectos como el control de flujo, siendo este el pilar del proyecto. Así mismo e indirectamente al variar el flujo la presión del agroquímico también tenía variaciones, por lo que era un elemento a tener en cuenta ya que, si sobrepasaba niveles máximos podría ocasionarle daños al sistema. La interfaz del usuario también se tuvo como un aspecto destacado ya que, en esta, el usuario tenía una comunicación con la máquina al poder establecer una referencia y así mismo poder saber qué cantidad es la que está aplicando a su cultivo. Esta interfaz debió ser lo más sencilla y práctica posible debido al tamaño de la máquina, así como también al trabajo que demanda el uso de esta por lo que no debía causar incomodidad al operador.

BIBLIOGRAFÍA

Allen Jr, John Clarence. "Automatic spot sprayer." U.S. Patente No. 3,959,924. 1 junio 1976. (último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2JbASCx>).

Atkins, Jones. «Principios de la Química.» En Pilas de Combustible, de Jones Atkins, 711. Buenos Aires: Panamericana, 2006. Recopilado en: 17 de octubre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2PxUTpx>).

Bochmann, Carl E. "Cordless electric sprayer." U.S. Patent No. 3,901,449. 26 agosto 1975. (Último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2OFMQKN>).

Bonilla, Álvaro. Cálculo de la Dosificación de un Plaguicida. Intagri (en línea). Enero 30, 2017. Recopilado en: 14 de agosto de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2OV02hQ>).

BOSCH, ROBERT «Baterías.» En Baterías de ion de Litio, de Robert Bosch. p.14 (en línea). Alemania: Bosch, 2000. Recopilado en: 22 de octubre del 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2PKAqOd>).

Bosch, Robert. «Manual de la Técnica del Automóvil.» En Baterías de ion de Litio, de Robert Bosch, 1233. Alemania: Bosch, 2005. Recopilado en: 17 de octubre del 2018 Tomado de: (<https://bit.ly/2CdSpZi>).

BRAND, CARLOS. Más de mil millones de abejas han muerto en Colombia en los últimos tres años (en línea). 16 de Febrero de 2018. Recopilado en: 21 de Octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2EyfHaA>).

Brejcha, Mathias. «Bombas Hidráulicas.» En Los Cambios Automáticos, de Mathias Brejcha, Bogotá: Reverté, 1978. p.141. Disponible en: (<https://bit.ly/2NhEIAa>).

Bridges, Edward B., and Lillian K. Bridges. "Portable wheeled electric sprayer with pressurized liquid reservoir." U.S. Patente No. 4,135,669. 23 enero 1979. (Último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2SaoXZX>).

Burkert. Sensor de rueda de aletas para caudales reducidos. Recopilado en: 03 de septiembre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2O7C9eU>).

Burls, Gary E., and William F. Parmentar. "Inductor nozzle assembly for crop sprayers." U.S. Patente No. 4,762,274. 9 agosto 1988. (Último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2Cz625z>).

DYNAMO, electronics. Baterías LiPo, Características y Cuidados (en línea). 29 de junio de 2017. Recopilado en: 22 de octubre de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2yrrt5W>).

FAO. Plagas y enfermedades de las Plantas (en línea). Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2CW3xv5>).

Flores. Agroquímicos. 2014. Recopilado en: 25 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2O9jZJA>).

Fuente: Google Imágenes. Sistemas de control de lazo cerrado. Recopilado en: 01 de noviembre de 2018. Tomado de: (<https://goo.gl/images/bxHKL8>).

García, P. (5 de septiembre de 2013). Franklin Electric. Obtenido de ¿Qué es el control PID? Recopilado en: 23 de octubre del 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2Seu1wy>).

Gianino , Rosario. «Google Patents.» Portable home and garden sprayer, power unit. Patent No. 5,931,207. 05 de marzo de 1997. (último acceso: 18 de Septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2qeXQ3j>).

Infoagro. Fundamentos de los sistemas de control del riego y la fertilización. Recopilado en: 23 de octubre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2SFMSKa>).

Inostroza, F.J. 2009. Manual de Papa para la Araucanía: Manejo y Plantación. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 193. Temuco, Chile. 115 p. Recopilado en: 14 de agosto de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2Aw3cx0>).

INTAGRI. 2017. Cálculo de la Dosificación de un Plaguicida. Serie Fitosanidad. Núm. 75. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 4 p. Recopilado en: 14 de agosto de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2OV02hQ>).

Júnior, Ronaldo Goulart Magno, et al. "Desenvolvimento de um dispositivo eletrostático para pulverizador pneumático costal." *ENGENHARIA NA AGRICULTURA/Engineering in Agriculture* 22.1 (2014): 9-16. (Último acceso: 22 de septiembre de 2018).

KUO, B. (1996). Sistemas de Control en Lazo Abierto. En B. Kuo, Sistemas de Control Automático. p.9. México: Prentice Hall. Recopilado en: 23 de octubre del 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2z1gtM6>).

Lestradet, Maurice CJ. "Liquid distributing apparatus and in particular a fertilizer or insecticide sprayer." U.S. Patente No. 4,202,498. 13 mayo 1980. (Último acceso: 18 de septiembre de 2018). Disponible en: (<http://bit.ly/2q6HR79>).

Martínez, Jesús. «Sistemas Eléctricos y Electrónicos de las Aeronaves.» En Pilas Níquel - Cadmio, de Jesús Martínez. Madrid: Thomson Paraninfo, 2007. p.15. Recopilado en: 17 de octubre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2RFaOUr>).

Martínez, Jesús. «Sistemas Eléctricos y Electrónicos de las Aeronaves.» En Pilas Níquel - Cadmio, de Jesús Martínez. Madrid: Thomson Paraninfo, 2007. p.15. Recopilado en: 17 de octubre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2RFaOUr>).

Mattié, Mailer. Las fumigaciones del Plan Colombia (en línea). 10 de julio del 2003. Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2JdFc4s>).

Mazzone, V. (2002). Controladores PID. Buenos Aires: Universidad Nacional de Quilmes. P.1-2. Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<http://bit.ly/2O0tkmY>).

Mott , Robert L. «Bomba de Diafragma.» En *Mecanica de Fluidos*, de Robert L Mott, Mexico: Pearson, 1996. p.413. Disponible: (<https://bit.ly/2DND444>).

Mott , Robert L. «Bombas Cinéticas.» En *Mecanica de Fluidos*, de Robert L Mott, Mexico: Pearson, 1996. p.413. Disponible: (<https://bit.ly/2DND444>).

Mott , Robert L. «Medidor de Flujo de Magnético.» En *Mecanica de Fluidos*, de Robert L Mott, Mexico: Pearson, 1996. p.413. Disponible: (<https://bit.ly/2DND444>).

Mott , Robert L. «Medidor de Flujo de Turbina.» En *Mecanica de Fluidos*, de Robert L Mott, Mexico: Pearson, 1996. p.413. Disponible: (<https://bit.ly/2DND444>).

Mott , Robert L. «Medidor de Vórtice.» En *Mecanica de Fluidos*, de Robert L Mott, Mexico: Pearson, 1996. p.413. Disponible: (<https://bit.ly/2DND444>).

Muhammad H Al-Khalifah, Gregory K. McMillan (2012). Control valve versus variable speed drive for flow control. ISA Automation Week. Recopilado en: 28 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2AwiVMe>).

NAVARRO, KRYSTEL. ¿Qué plagas afectan nuestros cultivos? (en línea). 27 de febrero de 2017. Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2rp4JyR>).

Omega. Sensores de plástico de flujo ultrabajo. Recopilado en: 03 de septiembre de 2018). Tomado de: (<https://bit.ly/2yB5yJh>).

Otello Baurone, A. (1991). El computador como elemento de Control. En A. Otello Baurone, Control por Computadora (pág. 4). Barcelona: Marcombo. Recopilado en: 23 de octubre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2q7ilyB>).

Peniche Ruiz, Larissa Jeannette, Jesús Benjamín Aragón Solís, and a. b. r. a. h. a. m. guerrero godoy. "aplicación móvil para fumigación semi-autónoma en invernaderos." (2016). (último acceso: 22 de septiembre de 2018). Tomado de (<http://bit.ly/2yvstedZ>).

Quintero, C., Oñate López, J., & Jiménez, J. (2014). Sistemas de Control Digital. En C. Quintero, J. Oñate López, & J. Jiménez, Control Automático Aplicado (pág. 129). Barranquilla: Universidad del Norte. Recopilado en: 23 de octubre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2AozZUy>).

Rakesh Nath y otros. "Fabrication of Controlled Droplet Application for Efficient use of Pesticides". Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India. 07 Julio 2017. Recopilado el: 01 de noviembre de 2018. (Tomado de: <https://bit.ly/2zpnwyk>).

RoyalCondor, Técnicas de Aplicación, Boquillas y Accesorios para Fumigación. Recopilado en: 25 de septiembre del 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2Pqimsm>).

Schulein, Joseph. "Electronic pest-control device having plural ultrasonic generators." U.S. Patente No. 3,893,106. 1 julio 1975. (Último acceso: 22 de septiembre de 2018). Disponible en: (<http://bit.ly/2OFjwE6>).

SEMANA, Si es fumigación, que sea mecanizada (en línea). 7 de enero de 2015. Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2CYERCj>).

Shigueaki Sasaki, Robson, et al. "Desempeño operacional de un pulverizador costal eléctrico." *Pesquisa Agropecuaria Tropical* 43.3 (2013). (Último acceso: 22 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2PmV4Hq>).

Shigueaki Sasaki, Robson., "Development of a solar photovoltaic backpack sprayer/Desenvolvimento de un pulverizador costal eléctrico fotovoltaico." *Comunicata Scientiae* 5.4 (2014): 395. (Ultimo acceso: 22 de septiembre de 2018). Tomado en: (<http://bit.ly/2q5SmHJ>).

Takei, Hisao, Nobumichi Hattori, Naoyuki Iwata, y Seiji Morita. «Google Patents.» Electric sprayer. Patente No. 3,565,344. 30 de junio de 1967. (Último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2AnWk4q>).

TMEIC. Pump Flow Control. Recopilado en: 28 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2yFKTnE>).

Valencia, Universidad de. Los agroquímicos más utilizados. 10 de diciembre de 2015. Recopilado en: 25 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2Sd4bsJ>).

VARGAS GAITÁN, Katherine. La agricultura colombiana en el contexto de la globalización (en línea). 7 de marzo de 2016. Recopilado en: 21 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2JTke9T>).

WANG Dashuai y otros. "Diseño y prueba del sistema dinámico de rociado variable de protección de plantas UAV". Universidad de Agricultura de China. Mayo del 2017. (Último acceso: 01 de noviembre de 2018). (Disponible en: <https://bit.ly/2PBugmQ>).

Weddle, Kenneth E. "Crop sprayer having offset frame which creates mounting space in which suspension assembly is located." U.S. Patente No. 6,056,210. 2 mayo 2000. (último acceso: 18 de septiembre de 2018). Tomado de: (<http://bit.ly/2EDUvET>).

ANEXOS

Anexo A. Batería LiPo Zippy.

Características:

Voltaje de Suministro	14.8 Voltios
Corriente	4 Amperios
Dimensiones	143mm x 53mm x 27mm
Peso	399 g

Precio: \$205.000 pesos.

Figura 76: Batería LiPo Zippy.



Fuente: Tdrobótica. Batería LiPo 4000 mAh 14.8V. Recopilado en: 29 de noviembre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2BFAudA>).

Anexo B. Batería Panasonic.

Características:

Voltaje de Suministro	12 Voltios
Corriente	8 Amperios
Dimensiones	5.94 x 2.56 x 3.70 cm
Peso	4.8 Lbs

Precio: \$103.000 pesos

Figura 77: Panasonic Batería.



Fuente: MercadoLibre. Power-Sonic Batería Replica. Gruber Power Gps-7.2-12 12v 7ah. Recopilado en: 29 de noviembre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2AzfkvH>).

Anexo C. Batería Multi Star

Características:

Voltaje de Suministro	11.1 Voltios
Corriente	5.2 Amperios
Dimensiones	106 mm x 44 mm x 34 mm
Peso	2.3 Kg

Precio: \$230.000 pesos.

Figura 78: Batería LiPo Multistar.



Fuente: Tdrobotica, Batería LiPo 5200 mAh 11.1V, Recopilado en: 29 de noviembre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2RrkqBo>).

Anexo D. Bomba para Agua de Diafragma DC.

Características

Presión de Trabajo	80 PSI
Caudal Máximo	4 L/min
Temperatura Ambiente	60°C
Voltaje de Funcionamiento	12 Voltios
Corriente de Funcionamiento	3 Amperios
Dimensiones	15.5cm (L) x 10cm (W) x 6 cm(H)

Precio: \$149.000 pesos.

Figura 79: Bomba para Agua DC Shui Zhi.



Fuente: Mercado Libre. Bomba de Agua eléctrica de Membrana. Recopilado en: 03 de septiembre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2D8z1hD>).

Anexo E. Bomba de Diafragma para Dispensador de Agua.

Características

Presión de Trabajo	40 PSI
Caudal Máximo	2 a 3 L/min
Temperatura Ambiente	60°C
Voltaje de Funcionamiento	12 Voltios
Corriente de Funcionamiento	0.3 Amperios
Dimensiones	85x40x32mm (L * W * H)

Precio: \$53.000 pesos.

Figura 80: Bomba de Diafragma para Dispensador de Agua.



Fuente: Mercado Libre. Bomba De Agua para Dispensador. Recopilado en: 03 de septiembre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2Pm28Eb>).

Anexo F. Bomba Para Riego BF.

Características

Presión de Trabajo	100 PSI
Caudal Máximo	4 L/min
Proceso de Absorción	2.5 m
Voltaje de Funcionamiento	12 Voltios
Corriente de Funcionamiento	5 Amperios
Dimensiones	15.5 cm (L) x 9.6 cm (W) x 6 cm (H)

Precio: \$160.000 pesos

Figura 81: Bomba Para Riego.



Fuente: Mercado Libre. Bomba De Agua 12v Para Dispensador. Recopilado en: 03 de septiembre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2zbHD2E>).

Anexo G. Sensor Medidor de Flujo G1/4.

Características

Voltaje de Operación	0V ~ 4.5 Voltios
Voltaje de Funcionamiento	3V ~ 18 Voltios
Margen de Flujo	0.3 L/min ~ 1.5 L/min
Conexión	Amarillo: Señal de pulso Rojo: +Vcc Negro: Ground

Precio: \$21.420 pesos

Figura 82: Sensor de Medición de Flujo G1/4.



Fuente: Vistronica. Sensor Medidor de Flujo G1/4. 2016. Recopilado en: 03 de septiembre de 2018). Tomado de: (<https://bit.ly/2EQ40ku>).

Anexo H. Sensores de flujo Ultrabajo.

Características

Presión de Trabajo	150 PSI
Margen de Flujo	0.1 a 2 L/min
Temperatura Ambiente	-40 a 85°C
Voltaje de Funcionamiento	8 a 24 Voltios
Corriente de Funcionamiento	6 a 33 mA

Precio: \$1.800.000 pesos

Figura 83: Caudalímetro Omega serie FTB600.



Fuente: Omega. Sensores de plástico de flujo ultrabajo. Recopilado en: 03 de septiembre de 2018). Tomado de: (<https://bit.ly/2yB5yJh>).

Anexo I. Sensor de bajo flujo para medición y control de lotes.

Características

Presión de Trabajo	145 PSI
Margen de Flujo	0.1 a 2.5 L/min
Temperatura Ambiente	-40 a 85°C
Voltaje de Funcionamiento	5 a 24 Voltios
Corriente de Funcionamiento	Max 11 mA

Precio: \$415.000 pesos

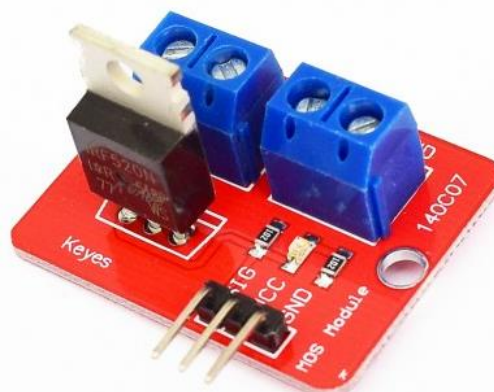
Figura 84: Sensor compacto de bajo flujo Tipo 8031.



Fuente: Burkert. Sensor de rueda de aletas para caudales reducidos. Recopilado en: 03 de septiembre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2O7C9eU>).

Anexo J: Módulo Mosfet IRF 520

Figura 85: Modulo Mosfet.



Fuente: Diotronic. Modulo Control MOSFET IRF520. Recopilado en: 03 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2qTeRA2>).

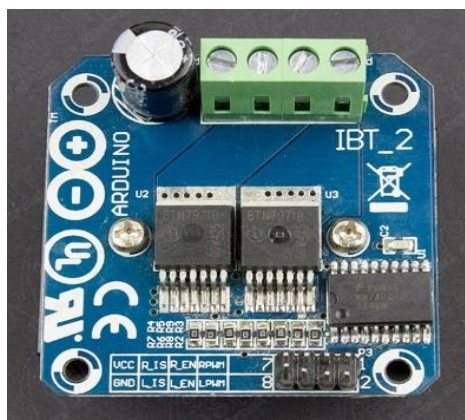
Características

Voltaje de salida	0-24 Voltios
Voltaje de control	5 Voltios TTL
Corriente máxima	9 Amperios
Corriente nominal	6 Amperios
Para cargas mayor a 6 Amperios usar disipador	

Precio: \$6.000 pesos

Anexo K: Módulo puente H BTS7960 de 43 A.

Figura 86: Modulo Puente H.



Fuente: Vistronica. Módulo puente H BTS7960 de 43A. Recopilado en: 03 de octubre de 2018. Tomado de: (<https://bit.ly/2S03e67>).

Características

Voltaje de operación	5.5 Voltios a 27 Voltios
Corriente de operación máxima	43A
Frecuencia de reloj	25KHz
Señal PWM	Dos canales
Contiene dos transistores MOSFET de tipo P y N con un controlador IC	

Precio: \$52.000 pesos

Anexo L: Definición de las Variables del Sistema.

```
#include <Wire.h> //Libreria para la comunicación i2C con la pantalla
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //Libreria para el funcionamiento de la pantalla
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); //Se programa la pantalla de 16x2
volatile int NumPulsos; //Variable para contar los pulsos del sensor
int PinSensor = 2; //Sensor de flujo conectado en el pin 2
int factor_conversion=98; //Factor dado por el fabricante para convertir de frecuencia a caudal
int PinVariador = 0; //Pin central del potenciómetro conectado en A0
int ref=0; //Variable para la referencia que introduce el usuario
float caudal_cc_m=0; //Variable para medir el caudal
int RPWM_Output = 5; // Define el pin 5 para la salida de PWM
int LPWM_Output = 6; // Define el pin 6 para la salida de PWM, en este caso sirve de tierra del motor
float I=0; //Variable control integral
float P=0; //Variable control proporcional
float Iant=0; //Variable para el control integral anterior
float error_ant=0; //Variable para el error anterior
float pwm=0; //Variable de la acción del controlador
```

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo M: Algoritmo de Interpretación de los Datos del Sensor de Flujo

```
void ContarPulsos () //Funcion para contar los pulsos que envia el sensor
{
    NumPulsos++; //Incrementa la variable de pulsos
}

int ObtenerFrecuencia() //Funcion para obtener la frecuencia de los pulsos
{
    int frecuencia; //Variable para definir la frecuencia
    NumPulsos = 0; //Pone a 0 el número de pulsos
    interrupts(); //Habilita las interrupciones de flanco de subida
    delay(500); //Muestra cada medio segundo
    frecuencia=NumPulsos*2; //Define la frecuencia en Hz(pulsos por segundo)
    NumPulsos = 0; //Pone a 0 el numero de pulsos
    return frecuencia; //Entrega el valor de frecuencia para luego ser usada en el loop
}
```

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo N: Algoritmo para la inicialización y funcionamiento de la pantalla LCD.

```
void setup() {
    Serial.begin(9600); //Inicializa la comunicacion serial
    lcd.init(); //Inicializa la LCD
    lcd.backlight(); //Inicializa la luz de la LCD
    lcd.setBacklight(HIGH); //Enciende la luz de la LCD
    lcd.setCursor(0,0); //Se situa en el primer renglon de la LCD
    lcd.print("Fumigadora"); //Muestra el mensaje "Fumigadora"
    NumPulsos=0; //Pone a 0 el numero de pulsos
    attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING); //Habilita la entrada para contar los pulsos que envia el sensor
    pinMode(RPWM_Output, OUTPUT); //Habilita la salida de PWM para el motor
    pinMode(LPWM_Output, OUTPUT); //Habilita la salida como tierra para el motor
}
```

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo O: Desarrollo del control PWM.

```
void loop() {
    float kp=1.11; //Variable para la ganancia del control proporcional
    float ki=0.15; //Variable para la ganancia del control integral
    float Ts=0.5; //Tiempo de accion del controlador en segundos
    int valorPot= analogRead(PinVariador)/10; //Lee el pin donde se envia el dato de referencia deseado por el usuario
    ref=valorPot*10+150; //Establece la referencia
    if(ref<300){
        ref=300; //Limita la referencia a 300 para valores inferiores a este
    }
    if(ref>1000){
        ref=1000; //Limita la referencia a 1000 para valores superiores a este
    }
    float frecuencia=ObtenerFrecuencia(); //Obtiene la frecuencia de los pulsos en Hz
    caudal_cc_m=frecuencia/factor_conversion*1000; //Establece el caudal en cm3/min
    int error=ref-caudal_cc_m; //Calcula el error del sistema
    P=kp*error; //Calcula el control proporcional
    if(pwm>0 && pwm<255) //Evalua el control integral siempre y cuando se encuentre dentro de los limites de pwm dede 0 hasta 255
    {
        I=Iant+(error+error_ant)*ki*Ts/2; //Calcula el control integral
    }
    pwm=P+I; //Accion resultante del controlador
}
```

Fuente: Elaboacion Propia.

Anexo P: Limitaciones del PWM el impresión de datos.

```
if (pwm>255){
    pwm=255; //Limita el pwm para valores superiores a 255
}
if (pwm<0){
    pwm=0; ///Limita el pwm para valores inferiores a 0
}
analogWrite(RPWM_Output, pwm); //Envia el valor de pwm para controlar el motor
analogWrite(LPWM_Output, 0); //Establece la tierra del motor
error_ant=error; //Calcula el error anterior
Iant=I; //Calcula la accion integral anterior
Serial.println(caudal_cc_m); //Envia el dato de caudal por el puerto serial para graficar los datos
lcd.clear(); //Limpia la pantalla
lcd.setCursor(0,0); //Se situa en el primer renglon de la LCD
lcd.print("Referencia= "); //Muestra el mensaje "Referencia= "
lcd.print(ref); //Seguido al mensaje anterior muestra en pantalla el valor de referencia ajustado
lcd.setCursor(0,1); //Se situa en el segundo renglon de la LCD
lcd.print("Flujo= "); //Muestra el mensaje "Flujo= "
lcd.print(caudal_cc_m); //Seguido al anterior mensaje muestra en pantalla el valor del caudal que esta circulando
}
```

Fuente: Elaboración Propia.